
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YENİ NESİL GÜNEŞ ENERJİLİ FOTOVOLTAİK-TERMAL BİR KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Erhan ARSLAN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2020

Erhan ARSLAN tarafından hazırlanan "YENİ NESİL GÜNEŞ ENERJİLİ FOTOVOLTAİK-TERMAL BİR KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ Ana Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi ……..……..
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Kamil SAÇILIK
Tarım Makinaları ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi ...……
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. İlhan CEYLAN
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi ...……
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Serhat KARYEYEN
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi ...……
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi .....……
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 27/04/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

Bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Erhan ARSLAN
27/04/2020

YENİ NESİL GÜNEŞ ENERJİLİ FOTOVOLTAİK-TERMAL BİR KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Erhan ARSLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2020

ÖZET

Bu çalışmada fotovoltaik termal (PV/T) bir güneş panelinin tasarımı ve imalatı yapılarak üretilen sıcak hava ve elektrik enerjisi ile kendi enerjisini üretebilen bir kurutma sistemi yapılması amaçlanmıştır. Elde edilen sıcak hava ve elektrik enerjisi ile farklı iki tarım ürünü olan nane ve elmanın kurutulmuştur. Deneylerde, ürün kurutulması için gerekli olan bileşenlerin, infrared lamba ve fanların, elektrik ihtiyacı PV'den elde edilen elektrikle karşılanmıştır. Fazla enerji de akülerde depo edilmiştir. PV/T imalatından önce panelden en yüksek verimi sağlamak için çalışmanın sayısal analizi ANSYS fluent programında modellenmiştir ve etkin ısı transferi en uygun kanatçık yapısı tespit edilmiştir. Sayısal çözümlemede mesh sayısı 65000 olduğunda, yaklaşımın deneysel değere oranı %2,5 olduğu; mesh sayısı 470000'e yükseldiğinde ise yaklaşım değerinin %0,58'e düştüğü saptanmıştır. Farklı mesh sayılarında çözümlemeler yapıldıktan sonra sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Sayısal ve deneysel çıkış sıcaklıkları arasında 1,1 ºC fark olduğu tespit edilmiştir. Deneyler dört farklı debide ($\dot{m}$=0,031087 kg/s, $\dot{m} = 0{,}02552$ kg/s, $\dot{m} = 0{,}04553$ kg/s, $\dot{m} = 0{,}036424$ kg/s) farklı iklim koşullarında (sonbahar ve kış mevsimlerinde) yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, PV/T'nin ortalama termal verimleri sırasıyla %37,10; %29,78; %49,50; %37,50, elektriksel verimleri ise %13,56; %13,73; %13,98; %12,99 olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimleri yine sırasıyla %15,43; %15,18; %16,15; %13,91 olarak hesaplanmıştır. Debinin $\dot{m}$ 0,04553 kg/s olduğu deneyde nane 290 dakikada; $\dot{m} = 0{,}036424$ kg/s olduğu deneyde ise elma 370 dakikada tamamen güneş enerjisi kullanılarak kurutulmuştur.

Bilim Kodu	:	92802
Anahtar Kelimeler	:	Güneş enerjisi, HAD, Kurutma, Fotovoltaik Termal Sistem, Enerji-Ekserji analizi
Sayfa Adedi	:	107
Danışman	:	Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

DESIGN AND ANALYSIS OF A NEW GENERATION SOLAR POWERED PHOTOVOLTAIC-THERMAL DRYING SYSTEM

(Ph. D. Thesis)

Erhan ARSLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2020

ABSTRACT

In this study, a photovoltaic thermal collector was designed and manufactured. It is aimed to make a self-sufficient system with hot air and electrical energy obtained from PV/T. The drying of the product is matched with the obtained hot air, while the operation of infrared lamps and fans is aimed with electrical energy. The system, which was designed to be integrated with the drying chamber, aims to dry two different agricultural products, mint and apple. Excess energy was stored in batteries. The numerical analysis of the study was modeled by using ANSYS fluent program to obtain the highest yield from the collector and the most suitable fin structure was determined. When the grid structure with fine mesh numbers of 65000 was selected, the difference between the predicted and the measured values was of around 2.5% while being the grid structure with the mesh numbers of 470000, the predicted esults were reasonably in agreement with the measurements (almost 0.58%). The experiments were carried out at four different flow rates ($\dot{m}$= 0.031087 kg/s, $\dot{m}$=0.02552 kg/s, $\dot{m}$=0.04553 kg/s, $\dot{m}$=0.036424 kg/s) under different climatic conditions (autumn and winter seasons). The mean thermal efficiencies of PV/T were 37.10%; 29.78%; 49.50%; 37.50%, electrical efficiency of 13.56%; 13.73%; 13.98%; 12.99%. Exergy yields were also of 15.43%; 15.18%; 16.15%; 13.91%. In the experiment in which the flow rate was $\dot{m}$ = 0.04553, 50 grams of mint leaves were used in 290 minutes; In the experiment in which $\dot{m}$= 0.036424, 100 g grated apples were dried in 370 minutes.

Science Code	:	92802
Key Words	:	Solar Energy, CFD, Drying, Photovoltaik Thermal System, Energy-Exergy Analysis
Page Number	:	107
Supervisor	:	Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında benden yardımlarını esirgemeyen ve katkılarıyla doğru hedefe yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a, güneş paneli temini için Seha Mühendislik Müşavirlik Ticaret ve Makina Sanayi A.Ş.'ye, deneylerde teknik desteklerinden dolayı Ebubekir DİŞLİ, Hüseyin ÇATALKAYA ve Arş. Gör. Meltem KOŞAN'a, Pandemi döneminde mezuniyet işlemlerim için gerekli işlemleri yapan sevgili arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Özlem MURAZ'a, hayatımın her döneminde varlığıyla bana destek olan biricik eşim Nurgül ARSLAN'a, oğlum Civan ŞEYHMUS'a ve aileme teşekkürlerimi arz ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR iv

İÇİNDEKİLER v

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1.Fotovoltaik Termal Panellerin Ekonomik Analizle İle İlgili Yapılan Çalışmalar 5

2.2. Güneş Panelinin Farklı Yöntemlerle Soğutulması İle İlgili Çalışmalar 6

2.3. Yardımcı Eleman Entegre Edilerek Yapılan Deneysel Ve Sayısal Çalışmalar .. 7

2.4. Farklı Hız ve Debilerle Yapılan Deneysel Ve Sayısal Çalışmalar 9

2.6. Farklı Geometrik Yapıdaki PV/T Panellerin Verimlerini İçeren Çalışmalar 13

2.7. Deneysel ve Sayısal Analizin Yer Aldığı Çalışmalar 17

2.8. Fotovoltaik Termal Panele Entegreli Kurutma İle İlgili Yapılan Çalışmalar 25

3. KURUTMANIN TEMELLERİ 29

3.1. Kurutma Tekniği-Farklı Tipteki Kurutma Teknikleri 29

3.2. Kurutucu Sistem Seçimi 29

3.3. Ürünlerde Suyun Önemi Ve Denge Nemi 30

3.4. Kurutma Yöntemleri 31

3.4.1. Konveksiyon tipi kurutucular 32

Sayfa

3.4.2. Kondüksiyon veya temas tipi kurutucular 32
3.4.3. Radyasyon tip kurutucular 32
3.4.4. İnfrared kurutma ve İnfrared kurutmanın avantajları..... 33
3.5. Kızılötesi Işınım Çeşitleri 35
4. MATERYAL VE METOT 43
4.1. Teorik Analiz ve Tasarım..... 43
4.2. Enerji Analizi 43
4.2.1. PV/T panelin termodinamik analizi için kullanılan formüller 45
4.3. Ekserji Analizi..... 47
4.4. Belirsizlik Analizi 50
4.5. Kurutma Eğrilerinin Analizi 51
4.6. Enviroekonomik (Çevresel Maliyet) Analiz 51
4.6.1. Sürdürülebilirlik endeksi ve geliştirme potansiyeli 52
4.7. Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) 53
4.7.1. Temel denklemler..... 54
4.7.2. Standart k-epsilon modeli 56
4.7.3. Modelin Oluşturulması, ağ yapısı ve sınır şartları 57
4.8. Sistemin Tasarımı ve Üretimi 58
4.9. Deney Sisteminin Hazırlanması 60
4.10. Deneysel Çalışma..... 62
5. BULGULAR VE SONUÇLAR 63
5.1. Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları 63
5.2. Kurutma Deneylerinin Sonuçları 77
5.2. Belirsizlik Analizi Sonuçları 80
5.2.1. Sıcaklık Ölçümünden Kaynaklı Hatalar..... 80
5.2.2. Hız için hata 81

Sayfa

5.2.3. Çevre sıcaklığı için hata 81
5.2.4. Bağıl nem için hata 82
5.2.5. Ürün ağırlığı için hata 82
5.2.6. Kanal kesiti için hata 82
5.2.7. Solar metre için hata 83
5.3. Sayısal Analiz Sonuçları 83
5.4. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Doğrulanması 85
5.5. Enviroekonomik Analiz Sonuçları 88
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 91
KAYNAKLAR 95
ÖZGEÇMİŞ 107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Farklı meterolojik şartlarda verimleri incelenen PV/T sistemler……. 18

Çizelge 2.2. Çalışma akışkanına göre literatürde yer alan PV/T paneller…… 20

Çizelge 2.3. Literatürde yer alan farklı kanatçık yapısına sahip PV/T'ler…….. 22

Çizelge 3.1. Bazı türlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri 103, 104 …… 30

Çizelge 3.2. Üründe kg başına uzaklaştırılan su için harcanan enerji miktarı 103, 104. 31

Çizelge 3.3. NIR ve FIR'ın (0.75-1.4 μm) gıda ürünlerine nüfuz etme derinliği 159, 172. 37

Çizelge 3.4. Gıdalar için kızılötesi emilim bandları [173, 174]..... 37

Çizelge 3.5. Bazı ürünlerin Nüfuz derinliği [182]. 40

Çizelge 3.6. 1 kg suyun buharlaşması için harcanması gereken enerji miktarı (MJ) 136. 40

Çizelge 4.1. PV/T panelin sistem özellikleri 44

Çizelge 4.2. Deney setinde kullanılan ekipmanların özellikleri…… 51

Çizelge 4.3. k-ε modelde kullanılan sabitler 7.....…… 57

Çizelge 4.4. PV/T panelin özellikleri…….. 59

Çizelge 4.5. DeneyPlanı…….. 62

Çizelge 5.1. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri ve belirsizlikleri …… 80

Çizelge 5.2. Farklı türbülans model sonuçları……. 86

Çizelge 5.3. Ekserji verimlerinin literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılması. 87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Çeşitli PV/T tiplerinin şematik olarak gösterilmesi 40..... 15

Şekil 2.2. Farklı PV/T'lerin şematik gösterimi: (a) Camsız, Tedlar'lı hava kolektörünün kesiti(i) (model I), (ii)Tedlar'sız (model Camsız, Tedlar'lı hava kolektörünün kesiti(i) (model I), (ii)Tedlar'sız (model II) (b) camlı, Tedlar'lı hava kolektörü kesiti(i) (model III), Tedlar'sız (model IV) (ii) 41. 16

Şekil 2.3. Kurutma entegreli PV/T sisteminin şematik diyagramı 95. 25

Şekil 2.4. PV/T kolektörlü sera kurutuculu sistem 48 25

Şekil 2.5. Kısmen kapalı PV/T'li kurutma sistemi 96 26

Şekil 2.6. Hibrit kurutuculu sistemi 97 26

Şekil 2.7. Brigitte ve ark. yaptığı çalışmanın deney setinin görünüşü 100..... 27

Şekil 2.8. Hibrid portatif güneş tüneli kurutucusu sistemi 101..... 28

Şekil 3.1. Elektromanyetik Spektrum 116 35

Şekil 3.2. Radyasyon sönümlenmesi (absorbsiyon, transmisyon ve refleksiyon) 116. .. 36

Şekil 3.3. Ana gıda bileşenlerinin su ile karşılaştırıldığında başlıca emme bantları [116]. 36

Şekil 4.1. PV/T panelin ısıl direnç modeli..... 46

Şekil 4.2. PV/T sistemin geometrisi 58

Şekil 4.3. PV/T sistemin mesh yapısı 58

Şekil 4.4. Deney setinin şematik gösterimi..... 61

Şekil 5.1. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 11/09/2019..... 64

Şekil 5.2. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 12/09/2019..... 64

Şekil 5.3. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 03/11/2019..... 65

Şekil 5.4. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 04/11/2019..... 66

Şekil 5.5. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 11/09/2019..... 67

Şekil 5.6. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 12/09/2019..... 68

Şekil 5.7. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 03/11/2019..... 69

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 04/11/2019..... 69

Şekil 5.9. Termal ve elektriksel verimle değişimi 11/09/2019 70

Şekil 5.10. Termal ve elektriksel verimle değişimi 12/09/2019 70

Şekil 5.11. Termal ve elektriksel verimle değişimi 03/11/2019 71

Şekil 5.12. Termal ve elektriksel verimle değişimi 04/11/2019 71

Şekil 5.13. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 11/09/2019 72

Şekil 5.14. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 12/09/2019 73

Şekil 5.15. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 03/11/2019 73

Şekil 5.16. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 04/11/2019 74

Şekil 5.17. Güneş enerjisinin dağılımı 11/09/2019..... 75

Şekil 5.18. Güneş enerjisinin dağılımı 12/09/2019..... 75

Şekil 5.19. Güneş enerjisinin dağılımı 03/11/2019..... 76

Şekil 5.20. Güneş enerjisinin dağılımı 04/11/2019..... 76

Şekil 5.21. Nem oranının zamana göre değişimi 77

Şekil 5.22. Kuru baza göre nem içeriği..... 78

Şekil 5.23. Kuruma hızının zamana göre değişimi 79

Şekil 5.24. Kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi 79

Şekil 5.25. PV Panel yüzey sıcaklığının dağılımı (a: kepslion, b: k omega, c: SST) 84

Şekil 5.26. k epsilon türbülans modeli PV/T giriş havası sıcaklığı dağılımı 84

Şekil 5.27. k epsilon türbülans modeli PV/T çıkış havası sıcaklığı dağılımı 84

Şekil 5.28. k epsilon türbülans modeli PV/T kanatçıkların sıcaklık dağılımı 84

Şekil 5.29. PV/T paneldeki ölçüm noktası..... 85

Şekil 5.30. Element sayısının deneysel sıcaklık değerine göre değişimi..... 86

Şekil 5.31. Sürdürülebilirlik indeksinin zaman göre değişimi..... 88

Şekil 5.32. Geliştirme potansiyelinin zamana göre değişimi..... 89

Şekil 5.33. CO2 azaltımının zamana göre değişimi..... 89

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.34. Çevresel maliyet analizi değerlerinin zamana göre değişmi 90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Laboratuvarında Üretilen PV/T 58

Resim 4.2. Mono kristal güneş paneli..... 59

Resim 4.3. PV/T panelin bileşenleri 60

Resim 4.4. Yeni nesil güneş enerjili fotovoltaik-termal bir kurutucunun fotoğrafı..... 61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\dot{m}$	kütlesel debi (kg/s)
A	alan (m^2)
c_p	özgül ısı (kJ/kgK)
Ea	aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
Ex_d	ekserji yıkımı (W)
Ex_{el}	elektriksel ekserji (W)
Ex_{in}	ekserji giren (W)
Ex_{out}	çıkan ekserji (W)
Ex_{th}	termal ekserji (W)
G	solar ışınım (W/m^2)
h	ısı taşınım katsayısı (W/mK)
I_{mp}	Maksimum Akım (A)
I_{sc}	kısa devre akımı (A)
$\dot{Q}$	kayıp ısı (W)
$\dot{Q}u$	kullanılabilir ısı (W)
T	sıcaklık (K)
U	toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
v	hava hızı (m/s)
V_{mp}	maksimum voltaj (V)
V_{oc}	açık devre voltajı (V)
α	emicilik (absorbtivite)
β_o	sıcaklık katsayısı (1/T)
η_c	solar hücre verimi (%)
η_{el}	elektriksel verim (%)
η_{em}	güneş paneli verimi (%)
η_o	standart koşullardaki elektriksel verim (%)
λ	dalga boyu

Simgeler	Açıklamalar
µm	mikrometre
τ	geçirgenlik
η	verim (%)
θ	PV açısı (°)
ρ	yoğunluk (kg/m^3)
$\boldsymbol{\sigma}$	Stefan-Boltzman sabiti (W/m^{2}K^4)
k	termal iletkenlik (W/mK)
L	uzunluk (m)
W	genişlik (m)
δ	derinlik (m)
$\boldsymbol{\Phi_{CO_2}}$	saatte azaltımı sağlanan CO_2 miktarı (kg CO_2/h)
$\boldsymbol{\Psi_{CO_2}}$	kömürün yanmasıyla çıkan CO_2 emisyonu miktarı
¢	cent
$\boldsymbol{Z_{CO_2}}$	Çevresel maliyet (saatlik CO_2 azaltım fiyatı, ¢/h)
$\boldsymbol{P_{CO_2}}$	kg CO_2 başına düşen karbon fiyatı
µ	viskozite (Pa.s)

Kısaltmalar	Açıklamalar
amb	ortam
BIPV	binaya entegre edilen
c	hücre
cell	hücre
CPV	konsantrefotovoltaik
DR	kurutma hızı (gsu/gkurumadde)
eff	efektif
el	elektrik
FF	fill faktör
FIR	uzak kızılötesi
GHz	gigahertz
HAD	hesaplamalı akışkan dinamiği
IR	infrared

Kısaltmalar	Açıklamalar
kWh	kilovatsaat
MHz	megahertz
MIR	orta kızılötesi
MJ	megajoule
mm	milimetre
MR	nem oranı
NIR	yakın kızılötesi
nm	nanometre
P	paketleme faktörü
PV	fotovoltaik
PV/T	fotovoltaiktermal
s	güneş
th	termal
THz	terahertz

1. GİRİŞ

Artan nüfusla beraber enerjiye olan talebin artması ve buna bağlı olarak mevcut enerji kaynaklarının hızla tükeneceği bilimsel bir gerçektir. Bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Ayrıca, tüm dünya için giderek büyüyen bir tehdide, iklim değişikliğine, karşı alınabilecek en iyi önlemlerin başında yine yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Güneş enerjisinin çevreye karbondioksit emisyonunun sıfır olması ve bedava olmasından dolayı, alternatif enerji kaynakları arasında ilk sırada yer almasını sağlamaktadır. Güneş enerjisinden ısı enerjisi üretimi için genelde düzlemsel kolektörler ve vakum tüpleri; elektrik enerjisi eldesi için de fotovoltaik (PV) teknolojiler kullanılmaktadır. Hem ısı hem elektrik enerjisinin aynı anda üretimini sağlamak için de fotovoltaik/termal (PV/T) paneller kullanılmaktadır [1].

Fotovoltaik paneller, üzerine gelen güneş radyasyonu doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. Ancak bu enerjinin çoğu elektrik enerjine dönüştürülemez. Ticari amaçla üretilen güneş panelleri gelen güneş radyasyonunun %20'sinden daha azını elektrik enerjisine dönüştürebilirken, %80'inden fazlasını ısı olarak çevreye yaymaktadır. Güneş panellerinin seri ya da paralel bağlanması ile ürettikleri akım ve gerilim değerleri istenilen seviyeye yükseltilebilmesi sağlanmaktadır. Üretilen enerjinin depolanması için de akülere ihtiyaç duyulmaktadır. Güneş panellerinden en verimli şekilde yarar sağlanması için, güneş radyasyonun, panele dik bir açı ile düşmesi gerekmektedir. Kuzey-güney enlemleri arasında bulunan güneş kuşağı adı verilen bölgede olması verimi artırmaktadır. Güneş panelinin hücre sıcaklığı arttıkça verimleri düşer. Güneş panelinin verimlerinin arttırılması için, sıcaklığının doğal ya da zorlanmış akışkan dolaşımı ile düşürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla son yıllarda güneş panellerinin tek başına kullanılmasına alternatif olarak hem ısı hem elektrik enerjisini aynı anda üretebilen soğutma donanımı ile birlikte kullanıldığı PV/T sistemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır [2]. Günümüzde elektrik verimini artırmak için termal toplayıcılar fotovoltaik hücrelerle birleştirilerek düşük sıcaklıkta ısı ve elektrik enerjisi elde etmek üzere PV/T panelleri olarak kullanılmaktadır.

Kurutma; herhangi bir tarım ürünün ihtiva ettiği suyun, ısı enerjisi yolu ile farklı teknikler kullanılarak buharlaştırılması ve istenilen nem seviyesine gelene kadar ortamdan uzaklaştırılması işlemidir. Suyun uzaklaştırılması için genelde sıcak hava kullanılmaktadır. Kurutulacak ürünün veya ortam havasının ısıtılması ile ya da ortama sıcak hava temini ile

ürünün sıcaklığı arttırılır. Böylece ürünün ihtiva ettiği nem miktarının azaltılması sağlanır ve ortamdaki sıcak havanın nem sığası (nem tutma kapasitesi) yükseltileceğinden buharlaşan sıvı kurutma havası ile ortamdan uzaklaştırılıp kurutma işlemi gerçekleştirilir. Kurutma işlemi için gerekli olan sıcak havanın temel bileşeni ısı enerjisi, hava akışı için fan kullanımının tükettiği elektrik enerjisi ve farklı diğer enerjiler kurutma süresi boyunca ihtiyaç duyulan enerji türleridir. Karbon kaynaklı yakıt kullanımının enerji sarfiyatı, çevre ve hava kirliliğine neden olduğundan, bu enerji ihtiyacının tamamının veya bir kısmının karşılanması için, birçok alanda olduğu gibi kurutma sistemlerinde de enerji verimliliğinin arttırılması ve alternatif enerji kaynaklarının entegre edilmesini zorunlu hale getirmiştir. Güneş kurutucularında gelişmişlik iki yönde ilerleyebilir. Bunlar; basit, düşük güçlü, kısa ömürlü ve nispeten düşük verimli kurutma sistemleri ve yüksek verimli, yüksek güçlü, uzun ömürlü gelişmiş kurutma sistemidir [3]. Endüstriyel açıdan kurutma sistemlerinde ikinci olanın seçilmesi daha doğru olacaktır.

Güneş enerjili kurutucular ve bu kurutucu sistemlere entegre edilen yardımcı elemanlar (infrared lamba) için gerekli yüksek enerji ihtiyacı giderek artan teknolojik gelişmelerle kurutma sistemlerinde güneş enerjili kurutucuların kullanılabilirliğini ortaya çıkarmıştır. Birçok tarım ürününün kurutulması için gerekli olan sıcak havanın ürettiği, ilk yatırım ile beraber işletme bakım maliyetlerinin düşük olması, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması, enerji tasarrufu sağlaması ve diğer alternatiflere göre daha ekonomik olması açısından güneş enerjili kurutucuların kullanımını daha cazip kılmıştır. PV/T paneller kurutma için gerekli olan hem ısı hem de elektrik enerjisinin tamamını güneşten sağlamaktadır ve bu paneller için yapılmış çalışmalar sınırlı sayıdadır. Uygun bir tasarımla kurutma için gerekli olan enerjinin sağlamasının yanı sıra fazla enerjinin de depolanması bu sistemler tarafından sağlanabilmektedir. Böylece kendi kendine yetebilen bir kurutma sisteminin yapımı sağlanmış olur.

Bu çalışmanın amacı fotovoltaik termal bir panel tasarlayıp bir kurutma sistemine entegre edilerek ürün kurutulması için gerekli enerjinin panel tarafından karşılanmasını sağlamaktır. PV/T panel tasarımı, imalatından önce ‘’Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği’’ (HAD) simülasyonu kullanılarak yapılan analize bağlı kalınarak yapılmıştır. HAD analizinin asıl amacı panel yapısına en uygun kanatçıkların tasarımını yapmak ve sistemden maksimum verim sağlamak amacıyla tasarımını geliştirmektir. Tasarımı yapılan panel Gazi Üniversitesi

Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuarında imal edilmiş ve deneyler de Gazi Üniversitesi Merkez Kampüs'ünde gerçekleştirilmiştir.

PV/T panelden elde edilecek sıcak havadan entegre edilen kurutucu yardımıyla ürün kurutulması, PV'den elde edilecek elektrik enerjisi ile de panel ve kurutucudaki fanların tüketeceği enerjinin karşılanması hedeflenmiştir. Fazla olan enerji ise akülerde depo edilecektir. Amaç, kendi kendine tamamen yetebilen, sıfır emisyonlu bir sistem geliştirerek ürünün en kaliteli biçimde ve en kısa sürede kurutulmasını sağlamaktır.

PV/T panel yüzeyine sonbahar ve kış aylarında gelen güneş ışınımının dik bir şekilde gelmesini sağlamak sırasıyla 24,8° ve 39,8°'lik açılarla deneyler yapılmıştır. PV verimi yüzey sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. PV'nin soğutulması için farklı debilerde HAD analizleri yapılmış böylece debinin verime olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan 4 farklı deneyde PV/T performansı test edilmiş birinci ve ikinci yasa analizleri yapılmış, sayısal çözümlemelerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kurutulan ürünlerin kurutma kinetiği açısından değerlendirilmeleri yapılmış ve tüm sonuçlar literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde PV/T kollektörler ile ilgili literatürde yer alan daha önceki çalışmalar alt konu başlıkları ile verilmiştir. Yapılan çalışmaların kapsam ve sonuçları açıkça ifade edilmeye çalışılmıştır. Literatürdeki çalışmalar, çalışmanın ana temasına göre alt konu başlığı altında bölümlere ayrılmış ve bu konuda yapılan çalışmalar detaylandırılmaya çalışılmıştır.

2.1. Fotovoltaik Termal Panellerin Ekonomik Analizle İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Solar panellerin performans ve ekonomik analizlerinin hesaplanmasının temel hedefi, her bir güneş hibrid PV/T paneller için rekabetçi özel fiyat aralığını bulmaktır. Ekonomik hesaplamalarda girdi, PV/T panel ve PV toplayıcıları, sistem maliyetleri için elektrik fiyatı ve maliyetleridir.

Kalogirou ve Tripanagnostopoulos (2006), PV/T panelden evsel sıcak su temini ve için elektrik üretiminin maliyet analizini araştırmış ve ekonomik olarak uygulanabilirliğini saptamışlardır [4].

Erdil ve ark. (2008), enerji üretimi amaçlı yaptıkları araştırmada PV/T panelin tasarımını yapmış ve üretmişlerdir. Güneş panelinin (0.6 m^2, iki adet), günde 2,8 kWh termal enerji ürettiği gözlemlenmiş ve bu termal enerjinin suyun ön ısıtması amacıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan maliyet analizi sonucunda amortisman süresinin 2 yıldan az olduğunu, bu yüzden PV/T sistemlerin ekonomik olarak daha cazip olduğunu savunmuşlardır [5].

Gomes ve ark. (2016), yoğunlaştırıcı PV/T (C-PV/T)'yi düşük enlemlerde deneysel olarak test etmişlerdir. Bu enlemlerde gerçekleştirilen deneyler sonucunda aynı yutucu alana sahip diğer PV/T'lerle karşılaştırıldığında %7-10 arasında daha verimli olduğunu ve %18 daha ucuz olduğunu saptamışlardır [6].

Riggs ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada C-PV/T'nin termo-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistemin maliyetinin hesaplanmasında, teknik malzemenin ve coğrafi şartların etkili olduğunu belirtmişlerdir. PV/T sistemlerin, mevcut elektrik ve doğalgaz fiyatına endeksli olarak konutlar için sıcak su temini, suyun tuzdan arındırılması, yağ geri

kazanımı gibi çeşitli alanlarda diğer potansiyel uygulamalarla ekonomik olarak rekabet edeceği vurgulanmıştır [7].

Bianchini ve ark. (2017), PV/T'lerde kullanılan soğutma suyunun nispeten daha sıcak olduğunu deneysel olarak test etmiş ve performans analizini yapmışlardır. Elde edilen sıcak suyun evsel uygulamalar için kullanılabileceği belirtilmiştir. Yapılan deneylerin PV/T'lerin kurulum alanının kısıtlı olduğu konut tipi uygulamalar için daha uygun olduğu vurgusu yapılmıştır [8].

2.2. Güneş Panelinin Farklı Yöntemlerle Soğutulması İle İlgili Çalışmalar

Daha verimli PV/T sistemler için güneş panelinin etkin bir şekilde soğutulması işlemi yapılmaktadır. Hava akışkanlı PV/T panellerde soğutma işlemi hava ile su akışkanlı olanlarda bu işlem su ile yapılmaktadır. Bu soğutma işlemlerinin birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. PV soğutulması amacıyla PV/T sistemlerin, performansının optimizasyonu için farklı parametrelerin en uygunlarının belirlenmesi gerekir.

Ceylan ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada güneş paneli sıcaklık kontrolüyle, panelin arka kısmına bağlı spiral borulardan geçen şebeke suyu ile soğutmayı amaçlamışlardır. Güneş panelinin sıcaklığı 45°C'de tutulacak şekilde tasarlanan sistemin elektrik verimini soğutmasız ve soğutmalı olarak sırasıyla %10 ve %13 olarak tespit etmişlerdir [9].

Ni ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada, hücre atık ısı toplama ile bir nanoakışkanlı spektral bölmeli PV/T sisteminin performansını tahmin etmek için basitleştirilmiş hesaplama modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada geleneksel PV/T sistemi ile nanoakışkanlı spektral bölmeli PV/T sistemi karşılaştırması yapılmış ve analiz edilmiştir. Sonuçlarda, ısı/elektrik oranı çoğunlukla nanoakışkanın optik geçirgenliğine bağlı olduğunu, diğer ayarlanabilir parametrelerin ise daha az etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir [10].

Preeven ve ark. (2018), PV/T'de yüzey soğutma üzerine yaptıkları çalışmada suyun distilasyonunu sağlamışlardır. PV/T'den elde edilen ısı doğrudan, PV'den elde edilen elektrik ise dolaylı olarak NiCr ısıtıcı yardımıyla sisteme dâhil edilerek güneş enerjisinden aktif kullanım sağlamışlardır. Tasarlanan PV/T sistemin geleneksel güneş enerjili ısıtıcılara göre %50 daha verimli olduğu ve PV veriminin ise %37,5 arttığı tespit edilmiştir [11].

Yukarıdaki çalışmalarda PV verimi %10-13 arasında değişmektedir. PV/T'lere cam, sırlı cam veya yutucu yüzeye kanatçık eklenmesi PV veriminde artışa neden olmaktadır.

Rajput ve Yang (2018), PV/T'deki PV'nin soğutulması için yaptıkları çalışmada kanatçık yapısına sahip PV/T ile su dolaşımlı iki PV/T'yi karşılaştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda PV/T panel sıcaklığının 58,4°C'den 47,9°C'ye kadar düştüğü gözlenmiştir. Güneş panelin ise kanatçık sayesinde 88,6°C'den 55,4°C'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca sabit rüzgâr hızlarında yapılan deneylerde PV panelin soğulması için kanatçık kullanımı önerilmiştir [12].

PV/T panel üreten firmalar (SolVar Systems ve Meyer Burger firması) sırasıyla elektriksel verimleri %15 ve %17,4, termal verimlilikleri %50 ve %60 olan PV/T ürettiklerini bildirmişlerdir [13].

Tonui ve ark. (2007), yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada camlı ve camsız PV/T sistemini soğutmak için çalışma akışkanı olarak havayı seçmişlerdir. Deneysel sonuçlar sayısal sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Doğal dolaşımlı olarak tasarlanan PV/T panelin deneysel ve sayısal sonuçları olarak birbiri ile uyum göstermiştir. Sisteme kanatçık eklenmesinin PV panel veriminde iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır [14].

Cuce ve ark. (2013), PV paneldeki voltaj-akım karakteristiklerinin sistem performansını nasıl etkilediğini saptamak amacıyla yaptığı kapsamlı çalışmada istatistiksel verilerden yararlanmıştır. İki çeşit güneş paneli (polikristal ve monokristal silisyum) kullanılarak yapılan deneyler 200-500 W/m^2 solar ışınıma ve 15-60°C sıcaklığa sahip ortamda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, solar ışınım yoğunluğunun akımı, PV hücresi sıcaklığının ise voltaj parametrelerini etkilediğini göstermiştir [15].

Huang, ve ark. (2001), PV hücrelerin gelen güneş ışınımının %20'sini elektriğe, geriye kalan %80'inini ise atık ısı olarak çevreye verildiğini yaptıkları deneysel çalışmayla tespit etmişlerdir [16].

2.3. Yardımcı Eleman Entegre Edilerek Yapılan Deneysel Ve Sayısal Çalışmalar

Ji ve arkadaşları (2007), PV/T performansını deneysel ve sayısal olarak birkaç sene boyunca test etmişlerdir. Çalışma akışkanı olarak hem hava hem de suyun kullanıldığı deneylerde ısı

transferini bu akışkanlarla sağlayıp, güneş panelinin soğumasını ve böylece verimini arttırmayı amaçlamışlardır. Güneş ışınımın artmasıyla verimin düştüğü gözlemlenmiştir. Verimin daha da artırılması için yeni bir PV/T panel tasarlayıp, yardımcı eleman olarak ısı pompası kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada ısı pompasıyla çalışma akışkanlarını buharlaştırma verimini %64-87, termal verimi %53-64 ve elektriksel verimini %12,4-13,5 aralığında hesaplamışlardır [17].

Wang (2015), yaptığı çalışmada çalışma akışkanı olarak havanın seçildiği yeni bir PV/T geliştirmiş ve deneysel olarak anlık performansını test etmiştir. Ortam sıcaklığının 6,5°C ve güneş ışınımının 581,5 W/m^2 olduğu ortamda termal ve elektrik verimi sırasıyla %43,8 ve %15 olarak kaydetmişlerdir. Sisteme ısı pompası bağlanarak yapılan deneylerde COP değerini ortalama 2,5 (2,0-2,6) olarak hesaplamışlardır. Sonuç olarak ısı pompasının kullanımıyla güneş panelinin soğutularak verimliliğinin arttırılabileceği belirtilmiştir [18].

Wang (2015), çift ve tek ısı kaynaklı ısı pompalı yeni bir PV/T tasarlayarak sistemin performans analizini deneysel olarak incelemiştir. Çift ısı kaynaklı ve tek ısı kaynaklı sistemin COP değerleri sırasıyla 2,49 ve 1,40 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, çift ısı kaynaklı sistemin tek ısı kaynaklı sisteme göre daha iyi bir performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Güneş panelinin verimi sırasıyla %14,5 ve %36,02 olarak hesaplamıştır. Isı pompasının COP değeri ise 4,08 olarak kaydedilmiştir. Bununla beraber sistemin ekserji verimi %33 olarak bulunmuştur [19].

Sukamongkol ve ark. (2010), çalışma akışkanı olarak havanın kullanıldığı bir PV/T tasarlayarak bir klima odasının enerji kullanımını deneysel ve sayısal olarak test etmişleridir. PV/T'ye entegre olacak şekilde ısı geri kazanımlı bir kondenser ile yaptıkları çalışmada 53°C ve %23 bağıl neme sahip yüksek sıcaklıklı kuru hava üretmişlerdir. Buna ek olarak sistemin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin PV/T'den sağlanabileceği ve sistemden %18 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir [20]. Zondag ve ark.(2004), ısı pompası destekli PV/T tasarlayarak konut ısınması için ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanabileceğini söylemişlerdir [21].

2.4. Farklı Hız ve Debilerle Yapılan Deneysel Ve Sayısal Çalışmalar

Güneş panelinin soğutulması için yapılan deneylerde farklı hızlar, farklı debiler denenmiştir. Aşağıda bunlarla ilgili bazı çalışmalar irdelenmiştir. Yapılan çalışmalarda debi arttıkça güneş panelinin veriminin ve buna bağlı olarak da genel verimin arttığı görülmüştür.

Preet ve ark. (2017), üç farklı PV/T sistemini deneysel olarak test etmişlerdir. Bunlar; faz değiştiren madde (FDM), katkılı ve katkısız sulu olarak tasarlanmıştır. Kütlesel debilerin elektrik ve termal verime olan etkisini araştırmak için farklı debilerde (0,013; 0,023 ve 0,031 kg/s) testler yapılmış ve sonuç olarak debi arttıkça verimin de arttığını tespit etmişlerdir. Termal ve elektriksel verimler katkılı ve katkısız suda sırasıyla, %53 ve %12,6 ila %48 ve %10,66 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak debi artışının ve suya eklenen katkı malzemesinin verimi etkilediği belirtilmiştir [22].

Shi ve ark. (2017), doğal dolaşımlı bir PV/T'yi deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma akışkanı olarak seçilen suyun pompalanması için harcanan enerjinin, PV'nin ürettiği enerjiden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, farklı debilerdeki elektrik ve termal verimlilikler test edilmiştir. Düşük radyasyon değerlerinde PV/T'nin çalışmasını ''histerezis'' olarak tanımlamış ve çalışması için uzun süre gerektiğini MATLAB simülasyonu ve deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Sonuç olarak, ortalama yıllık elektrik üretim verimliliğinin %10,1; toplam verimliliğin %44,2 ve entegre verimliliğin %60 olduğunu bildirmişlerdir [23].

Chen ve ark. (2018), konutlardaki sıcak su temini PV/T'nin performans analizi ve optimizasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada, 4 farklı sistem (sırsız PV/T, sırlı PV/T, PV ve düz plakalı termal kolektör) tasarlanarak bu sistemlerin optimizasyonu için farklı debilerle (0,0085; 0,011 ve 0,04 kg/s) test edilmiştir. Çalışma sonucunda sıcaklığın, güneş ışınımın ve rüzgâr hızının yanında kütlesel debinin de performansı etkilediği saptanmıştır. 2 m^2 camlı PV/T için depo hacmi optimal değerinin 99,5 ile 218,6 L arasında olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, deneyler sonucunda 0,04 kg/s debiye sahip sistemin konut tipi sıcak su temini için uygun olduğu söylenmiştir [24].

Çalışmalarda verimin hangi parametreden ne kadar etkilendiğini saptamak için hem deneysel hem simülasyonla deneyler yapılmıştır.

Karima ve ark. (2014), MATLAB simülasyonu ile PV panelin soğutulmasını sayısal olarak incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, panelin altına fan motoru yerleştirerek soğutma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma akışkanı olarak havanın kullanıldığı dört farklı PV/T tasarlayıp birbiri ile karşılaştırmışlardır. Model 1:kontrol paneli, model 2:tek kanallı çift geçişli,model 3:çift kanallı tek geçişli ve model 4:tek kanallı tek geçişli olarak tasarlanan PV/T'lerin ortalama verimliliği en yüksek olan model 3 ardından model 2 ve model 4 olarak belirlenmiştir. Tek kanal tek geçişli olanın ise elektrik veriminin en yüksek olduğu saptanmıştır. Ek olarak güneş panelinin soğutulması için harcanan gücün debi ile orantılı olarak arttığı ve en az güç harcanan modelin model 3 olduğu belirtilmiştir. Her model için optimum bir kütle debisi olduğu söylenmiş, debinin artmasıyla elektriksel verimin de arttığı sonucuna varılmıştır [13].

Hajji ve ark.(2015), yaptıkları çalışmada PV'nin soğutulması için su kullanmışlardır. Isınan suyu depoda biriktirerek suyun sıcaklığının daima güneş panelinden daha düşük olması sağlanmıştır. Performans analizinin farklı parametrik koşullarla (akış oranı, rüzgâr hızı, solar ışınım, cam kapak sayısı vb.) beraber kuvvetli olarak debiye de bağlı olduğu vurgulanmış ve bu amaçla kütle debisi 0,01 ile 0,1 kg/s ye yükseltilerek çeşitli debilerde testler yapılmıştır. PV panel sıcaklığının kütle debisinin artmasıyla aniden düştüğü gözlemlenmiştir [25].

Rahman ve ark. (2015), PV hücresi sıcaklığının hangi parametrelerden ne kadar etkilendiğini saptamak amacıyla laboratuar şartlarında 27°C sıcaklıkta, 400-1000 W/m^2 ışınımda, 40-160 L/h debide (su) ve ortamdaki bağıl nemin %40-60 aralığında olan şartlarda deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Işınımın 1000 W/m^2 olduğu durumda soğutma olmadan yapılan deneylerde güneş paneli sıcaklığı 56°C olarak ölçülmüş ve veriminin %3,13'e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Güneş panelinin arkasında hücrede biriken ısıyı almak için bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Güneş paneli sıcaklığındaki her 1°C artışın 0,37 W'lık enerji kaybına, elektriksel verimde ise %0,006'lık bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum daha iyi anlaşılması açısından solar ışınımdaki her 100 W/m^2 artmasına bağlı olarak çıkış gücünün 2,94W artmasına, PV hücre sıcaklığının 4,93°C yükselmesine neden olmaktadır. Soğutucu akışkan olarak suyun kullanıldığı çalışmada güneş paneli sıcaklığını 22,4°C 'ye düşürülmüştür. Çıkış gücü 8,04W ve elektriksel verimi %1,23 artırmıştır. Bu verim soğutma olmadan elde edilen verimden %27,33 daha yüksektir. Bağıl nemindeki

%20'lik artışın, güneş panelinin çıkış gücünde 3,16W'lık düşüşe neden olduğu ve yüzeydeki tozun da çıkış gücünde 7,7 W azalmaya sebep olduğu belirtilmiştir [26].

Duran (2014), yaptığı çalışmada PV/T sistemin termodinamik ve performans analizini deneysel olarak test etmiştir. PV'nin arkasına yerleştirilen borulardan su geçirilerek soğutulması sağlanmıştır. Depodaki su eşanjörden geçirilerek kullanılabilir sıcak su elde edilmiştir. Soğutma farklı debilerde (0,16 ile 0,33 kg/s) yapılarak debi artışına bağlı olarak verimlilikler hesaplanmıştır. Soğutma yapılarak yapılan deneylerde PV veriminde %7'lik bir artış olduğu, %35 oranında da güç artışı olduğu gözlemlenmiştir. Sistemin ekserji verimi de hesaplanarak %21 olarak kaydedilmiştir [27].

Ceylan ve Gürel (2015), yaptıkları çalışmada güneş panelinin soğutulması için deneysel olarak incelemişlerdir. Sistemin güneş paneli verimi 45°C'de %17, ekserji verimi ise 55°C'de %21 olarak elde edilmiştir [28].

Saloux ve Teyssedou (2013), yaptığı çalışmada PV/T panelinin ekserji metoduyla verimlilikleri 500 W/m^2 ve 18°C ortam koşullarında test edilmiş, her sistem için ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda güneş panelinin veriminin dış ortam sıcaklığına kuvvetle bağlı olduğu vurgulanmış ve PV/T paneldeki güneş panelinin normal güneş paneline göre daha yüksek enerji ve ekserji verimine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Mono kristal, Poli kristal ve amorf silikon malzeme yapısındaki güneş panelleri verimleri arasında en iyi verimin mono kristale ait olduğu saptanmıştır [29].

Sobhnamayan ve ark. (2014), PV/T-su panelin optimal performans analizini belirlemek amacıyla ekserji verimini incelemiştir. Bunu belirlemek amacıyla enerji veriminin yanında ekserji veriminin termal ve elektriksel parametrelerin analitik ifadesinde önemi üzerinde vurgu yapılmıştır. Geliştirilen bilgisayar simülasyonu sayesinde ekserji veriminin optimizasyonu için genetik algoritma (GA) yöntemi kullanılmış ve sonuçların daha önce yapılan çalışmalarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Simülasyon sonucu ekserji verimi %11,36 olarak kaydedilmiştir [30].

Infield ve ark. (2000), hava ile soğutulan çift camlı PV'leri bina cephesine monte edilerek performansını değerlendirdikleri çalışmada debinin verime olan etkisini incelemişlerdir. Debinin 0,3 m/s hızda olduğu durumda verimin %25,8 olduğunu saptamışlardır [31].

2.5. Ekserji analizi ile ilgili çalışmalar

Kolhe ve ark. (2013), konsantre PV'nin (CPV) su kullanılarak soğutulması amacıyla yaptıkları çalışmada bir CPV geliştirmiş ve imal etmişlerdir. Su soğutması ve konsantrasyona sahip CPV'den elde edilen çıkış gücü ile soğutma ve konsantre olmadan CPV'den elde edilen çıkış gücü arasında 4,7-5,2 kat fark olduğu saptanmıştır. Ayrıca çıkış gücünün suyun debisine bağlı olduğu, çekilen ısı miktarı ile hücre sıcaklığının bundan etkilendiğini belirtmişlerdir [32].

Cuce ve ark. (2014), PV hücresinin farklı sıcaklıklardaki performansını araştırmak amacıyla deneysel ve sayısal testler yapmışlardır. Çeşitli sıcaklıklarda yaptıkları deneylerde PV hücresinin sıcaklığının artmasıyla güç çıkışının ve ekserji veriminin önemli oranda azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca hava yapılan deneylerde PV hücresinin soğutulmasının daha büyük uygulamalar için önemli oranda etkili olduğu söylenmiştir [33].

Zimmermann ve ark. (2015), mono kristal güneş paneline sahip PV/T panelin soğutulması için mikro kanallarla entegre edilen sistemin performans analizini test etmişlerdir. Soğutmayla beraber toplam güç çıkışında ekserji veriminin %50 oranında ve solar ışınımdan yararlanma oranının ise %60 oranında arttığını hesaplamışlardır [34].

Zagorska ve ark. (2012), deneysel olarak test ettikleri PV/T'nin 55 günlük peryotta toplam 23,01 kWh, 240 günlük peryotta ise toplam 100 kWh enerji ürettiğini söylemişlerdir. Soğutma suyunun çevre sıcaklığından 16°C daha yüksek olduğu günde dahi bataryanın elektrik gücünün 146,5 kWh olduğunu kaydetmişlerdir [35].

Radziemska ve ark. (2003), deneysel olarak yaptıkları çalışmada farklı sıcaklıklardaki güneş panellerinin elektriksel verimlerini incelemişlerdir. 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C ile yapılan deneylerde en yüksek verimin 20°C'de yapılan deneyde olduğunu kaydetmişlerdir. Ayrıca, güneş paneli her 1°C'lik artışın anlık veri yaklaşık %0,65 oranında azalttığını tespit etmişlerdir [36].

Teo ve ark. (2012), paneli aktif olarak soğutmak için paralel levhalar giriş ve çıkış manifoldlu olarak üniform akım sağlayacak şekilde panelin arkasına geçirmişlerdir. Deneyleri aktif soğutmalı ve soğutmasız olarak yapmışlardır. Sıcaklık ve verim arasında

lineer bir oran bulunmuştur. Soğutmasız olan sistemdeki verimin %8-9, soğutmalı sistemdeki verimin %12-14 olduğunu belirtmişlerdir. Deneyde 55W'lık polikristal panel kullanmışlardır. PV akımı, PV voltajı, panel sıcaklığı, giriş ve çıkış hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve solar radyasyon gibi parametreleri ölçmüşlerdir [37].

2.6. Farklı Geometrik Yapıdaki PV/T Panellerin Verimlerini İçeren Çalışmalar

Soğutma akışkanı olarak havanın kullanıldığı PV/T sistemler su ile soğutulanlara göre uygulaması daha basit bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Her ne kadar su ile soğutması yapılan PV/T'lere göre verimi daha az olsa da binaya entegre edilen (BIPVT) sistemler sayesinde üretilen sıcak hava binada bulunan havalandırma sistemine yönlendirilerek binanın ısınması sağlanabilmektedir.

Tonui ve ark. (2008), PV'lerin doğal taşınımla soğutulması için camlı ve camsız olarak imal ettikleri PV/T'nin ısı transferini iyileştirilmesi için yaptıkları deneysel çalışmada havanın doğal taşınımla istenilen sonucu vermediğini ve bir yararının olmadığını belirtmişlerdir. Ancak sisteme cam eklemek suretiyle yapılan deneylerde termal verimde iyileşme olmasına karşın elektriksel verimin azaldığını tespit etmişlerdir. Isı transferini arttırmak için kanatçıklı yapı kullanımını önermişlerdir [38].

Tripanagnostopoulos ve ark. (2002), su soğutmalı PV/T sistemi camlı ve camsız olarak test etmişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda, camlı sistemin termal verimi %30 oranında arttırdığını, ancak elektriksel verimin %16 oranında düşürdüğünü gözlemlemişlerdir [39].

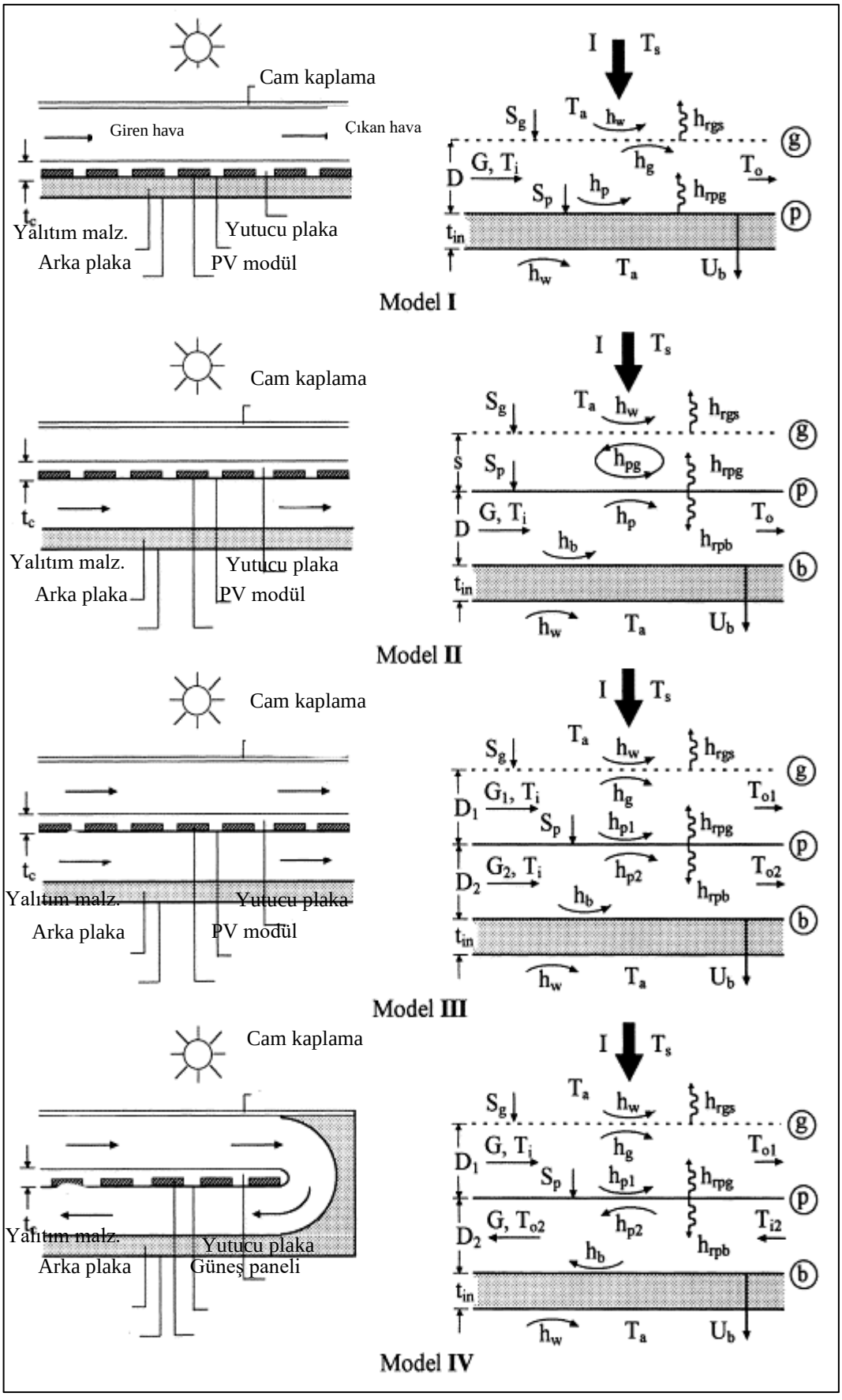
Chow ve ark. 2009, binaya entegre edilebilen bir PV/T sistemin yıllık performans analizi için yaptıkları çalışma sonucnda termal verimi yıllık olarak %37,5, elektriksel verimi ise %9,39 olarak tespit etmişlerdir [40].

Engin ve Çolak (2008), su soğutmalı yarı saydam bir PV/T panel tasarlayarak, İzmir iklim koşullarında deneysel olarak analiz etmişlerdir. Sıcaklığın yarı saydam a-Si güneş paneli verimi önemli oranda etkilediğini gözlemlemişlerdir [41].

Shahsavar ve Ameri, (2010), İran iklim koşullarında tasarladıkları hava dolaşımlı PV/T panelleri deneysel olarak incelemişlerdir. Çift hava kanalının bulunduğu PV/T panelleri camlı ve camsız olarak hem doğal hem de zorlanmış taşınımla (2, 4, 8 adet fanla) performans

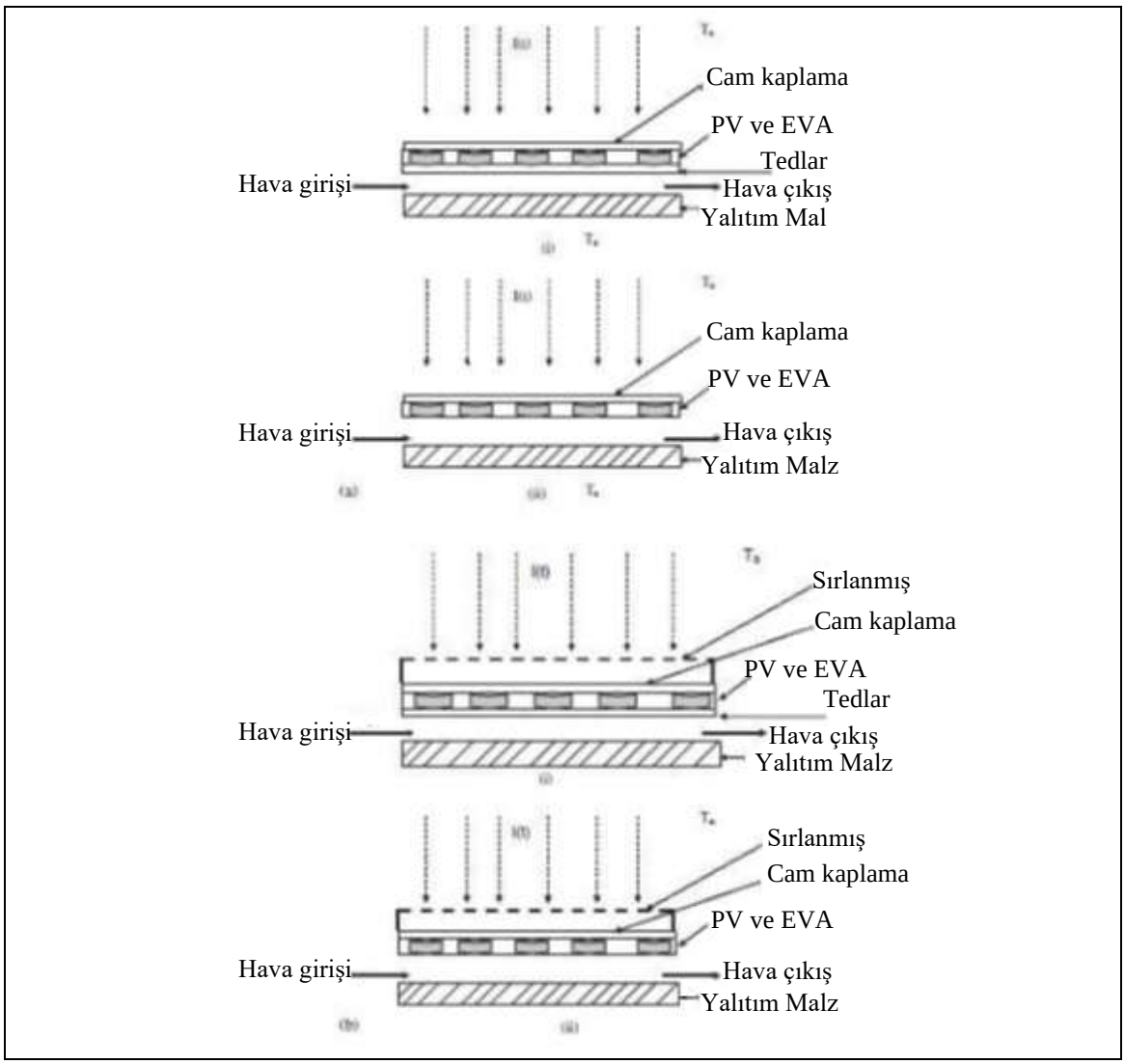
analizi yapılmak üzere test etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, zorlanmış taşınımla yapılan testlerdeki genel verimin birbirine yakın olduğunu göstermiştir. Ayrıca camlı sistemin genel veriminin daha fazla olduğunu; camsız sistemin termal veriminin daha az, elektriksel verimin daha fazla olduğu gözlemlemelerine rağmen termal verim kaybını karşılamadığı sonucunu elde etmişlerdir [42].

Adel A. Hegazy (2000), hava ile soğutulan PV/T panelin kapsamlı performans analizi için 4 farklı tipte model (Şekil 2.1) geliştirerek termal ve elektriksel verimlerini incelemişlerdir. Şekil 2.1'de çalışmalarında kullanılan PV/T panellerin şematik gösterimi ısı transfer katsayılarıyla beraber verilmiştir. Sonuçlara göre termal verimin havanın debisine kuvvetle bağlı olduğunu ve orantılı olarak (debi arttıkça) arttığını tespit etmişlerdir. Bu durumun hava sıcaklığında azalmaya ve dolayısıyla ihtiyaç duyulan fan gücünün artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Soğutmanın etkisiyle PV veriminde artış gözlemlenmiş fakat bu artışın çok az olduğunu tespit etmişlerdir. Buna göre debi arttıkça net elektrik enerjisinde azalma meydana geldiği görmüşlerdir. Ayrıca, 4 tip PV/T panelin karşılaştırması sonucunda termal ve elektrik verimin en yüksek olduğu model, ‘‘MODEL III’’ olarak belirtilmiştir [43].



Şekil 2.1. Çeşitli PV/T tiplerinin şematik olarak gösterilmesi [40].

Tiwari ve Sodha (2006), yaptıkları deneysel 4 farklı tipte hava ile soğutulan PV/T panelin performans analizini incelemişlerdir. Şekil 2.2.'de yaptıkları deneysel çalışmalarında kullandıkları PV/T çeşitlerinin şematik gösterimi verilmiştir. Sırlı ve sırsız camlı PV/T'leri tedlarlı ve tedlarsız olarak tasarlamışlardır. Sırsız modellerde tedlar kullanımı PV hücre sıcaklıklarında düşüşe neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak sırlı modellerde tedlar kullanılmayan Model 4'te çıkış havası sıcaklığında çok az bir azalma meydana geldiğini, ek olarak, panel uzunluğundaki artışının toplam verimi düşürdüğünü belirtmişlerdir. Bunun sebebi olarak da uzunluk arttıkça kayıpların da orantılı olarak artmasından kaynaklı olduğunu tespit etmişlerdir [44].



Şekil 2.2. Farklı PV/T'lerin şematik gösterimi: (a) Camsız, Tedlar'lı hava kolektörünün kesiti(i) (model I), (ii)Tedlar'sız (model Camsız, Tedlar'lı hava kolektörünün kesiti(i) (model I), (ii)Tedlar'sız (model II) (b) camlı, Tedlar'lı hava kolektörü kesiti(i) (model III), Tedlar'sız (model IV) (ii) [41].

Bosonac ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada binaya entegre edilebilen hava soğutmalı PV/T'nin analizini incelemişlerdir. Danimarka iklim koşulları göz önünde bulundurularak yapılan çalışmada öncelikle optimum debi için çalışmalar yapılmış ve metrekareden 40-50 m^3 hava geçecek şekilde tasarım yapmışlardır. Bu durumda sistemin toplam verimi %45-47 olarak tespit etmişlerdir. Dış hava sıcaklığının düşük olması nedeniyle PV hücrelerin maksimum verimde çalıştığını belirtmişlerdir [45].

2.7. Deneysel ve Sayısal Analizin Yer Aldığı Çalışmalar

PV/T sistemlerin tasarımının veriminin arttırılması doğru bir sayısal modele ihtiyaç duyar.

Fernandes ve ark. (2017), PV/T'deki PV diziliminin performansını simülasyon ve laboratuar şartlarında deneysel olarak test etmişlerdir. Aralık ayında İsveç'te laboratuvarr şartlarındaki deneylerin simülasyonu doğruladığı sonucuna varılmış ve elektrik verimini %20 olarak kaydetmişlerdir [46].

Doğanay (2014), PV/T sistemin termodinamik analizini TRNSYS simülasyon programıyla farklı eğim açılarında değerlendirmişlerdir. Sistem, kamu hizmet binasının bir yıllık elektrik tüketimi baz alınarak dizayn edilmiş ve uygulanabilirliği simülasyon program yardımıyla hesaplamışlardır [47].

Barnwall ve Tiwari (2008), deneysel olarak yaptığı çalışmada, PV/T'nin sera tipi kurutmada kullanımı için tasarım geliştirmişlerdir. Sistemde ısı ve kütle transferini belirlemek için sera havasının sıcaklığı ve nemi ile kurutulan ürünün (üzüm) sıcaklığı ve nemi saatlik olarak kaydedilmiştir. Kurutulan ürün olarak olgunlaşmış ve olgunlaşmamış iki tip üzüm seçmişlerdir. Ürünlerin ısı transfer katsayıları sera ve açık alanda ayrı ayrı test edilmiştir. Serada kurutulan olgunlaşmış üzümlerin ısı transfer katsayıları 0,26-0,36 W/m^2K; açık alanda 0,36-0,4 W/m^2K; serada kurutulan olgunlaşmamış üzümlerin ısı transfer katsayıları 0,45-1,21 W/m^2K; açık alanda ise 0,46-0,97 W/m^2K olarak saptamışlardır. Sonuç olarak olgunlaşmamış üzümlerin ısı transfer katsayıları daha yüksek olduğundan kuruması için gereken sürenin daha az olduğunu belirtmişlerdir [48].

H.P. Garg ve R.S. Adhikari, hava ile soğutulan PV/T kolektörün performansını simülasyon yardımıyla sayısal olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada PV/T'de tek ve çift cam

kullanımının performansı nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Sonuç olarak, tek ve çift cam kullanımının termal verimi ortam sıcaklığı koşullarına bağlı olarak etkilediğini saptamışlardır [49,50].

Literatürde yer alan bazı çalışmaları deneylerin yapıldığı yerin iklim şartlarına göre elektriksel ve termal verimleri sınıflandırılarak PV/T kolektörler hakkında genel bilgi almak mümkündür.

Çizelge 2.1'de çalışmalar incelenmiş, kullanılan PV çeşitleri, deneylerin yapıldığı yer ve tarihleri, PV/T çeşitleri ve PV/T sistemin özellikleri ayrı ayrı incelenmiş ve derlenmiştir. Çizelge 2.2'de ise PV/T sistemlerin kullanılan çalışma akışkanına (hava, su ve nanoakışkan) göre sınıflandırılması yapılmış, elektriksel, termal ve genel verimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı meterolojik şartlarda verimleri incelenen PV/T sistemler

Yazar ve kaynak	Sistem parametreleri	Elektriksel verim	Isıl verim	Genel verim	Deneyin yeri ve süresi	Sonuçlar
[51]	Düz plaka Tek camlı, sırlı, Fresnel konsantratörü, Polimer emici, Su soğutmalı PV/T sistemi,	%13,5	%46,7	%60	İspanya 06:00-18:00	Kış mevsiminde test edilmiştir. Tek bir kontrol noktası olarak giriş sıcaklığı seçilmiş ve 10°C ile 50°C arasında ölçülmüştür. Akış Debisi ise 0,02 ila 0,1 kg/s arasında değişim göstermiştir.
[52]	Düz plaka Mono-kristal sırlı camlı su soğutmalı, kare veya dikdörtgen kanallı.	%11	%51	%62	Hong Kong, Çin 08:00-18	Deneyler 2 Eylül ve 1 Ocak tarihli farklı iklim koşullarında yapılmıştır.
[53]	Termosifonik tip su soğutma sistemine sahip düz plakalı PV/T.	%12,34 %10,10 %13,85	%27,47 %39,07 %48,47	%40 %47 %63	Yunanistan 06:00-20:00	PV/T sırsız camlı PV/T sırlı camlı PV/T diffüz reflektörlü
[54]	Düz plaka Mono-kristal, camlı, su soğutmalı, BIPVT sistem.	%14,2 %14,6 %13,8 %14,5	%40,2 %65 %78 %40	%54 %80 %91 %55	Yeni Zelanda 08:00-18:00	Çelik boru genişlik en/boy oranı 1.5; iletkenlik 90 W/mK; geçirgenlik soğurma ürün 0,86 Deneyler Rüzgar hızının 8 m/solduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.1. (devam) Farklı meterolojik şartlarda verimleri incelenen PV/T sistemler

[55]	Düz plaka Mono-kristal PV/T	%15	%60	%80	Cezayir 10:00-18:00	Deneyler 33°C çevre sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Rüzgarın sakin olduğu koşullar seçilmiştir.
[56]	Düz plaka Mono-kristalli sırlı camlı, hava sirkülasyonlu mikro kanallı güneş pili PV/T sistemi.	%14,7	%10,8	%20	Cezayir 12:00-14:00 Cezayir	İki adet PV/T sistem deneysel olarak günde 2 saat test edilmiştir. Bunlardan mikro kanala sahip olan sistemin, tek kanallı olandan %26,7 daha fazla verime sahip olduğu görülmüştür.
[16]	Yassı plaka poli-kristal PV/T panel, Sırsız, sıvılı pompa kontrollü	%14,46	%47,21	%63	Tayvan 09:00-17:00	120 litrelik bir su tankının sıcaklığını 26°C'den 40°C'ye yükseltmek için yapılan deneylerde deneyin yapıldığı yerin ışınımı 12,83 MJ/m^2 olarak ölçülmüştür. PV soğutulmuştur.
[57]	Su soğutmalı, düz plaka FGM mono kristal güneş paneli	%11,5	%55,2	%71	New York, ABD	1100 W/m^2 ışınım ve 66ml/dak. debide deneyler yapılmış ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Panelin arkasına fonksiyonel olarak derecelenmiş malzeme bağlanarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
[13]	Hava soğutmalı düz plaka polikristal PV/T paneli	%9,4	%46	%55	Irak 06:00-17:00	Çalışma akışkanı olarak havanın seçildiği deneysel çalışmada, çift geçişli, tek kanallı PV/T sistemin akış debisi 0,0991 kg/s ve giriş hava sıcaklığı 44,3°C olan şartlarda gerçekleştirilmiştir.
[58]	Düz plaka, BIPVT,polikristalli tek sırlı camlı su soğutmalı sistem.	%10,8	%48	%59	Malezya 10:00-17:00	PV/T deneyleri ortalama 0,027 kg/s debide, 690 W/m^2'lik ışınımda yapılmıştır.
[59]	Düz plakalı, soğutma sistemli, ısı borulu PV/T	%16,4	%23,5	%40	Çin 08:00-18:00	Deneyler Çin'de kış şartlarında şartlarında gerçekleştirilmiştir. Havanın bulutlu olduğu meteoroloji şartlarda deneyler gerçekleştirilmiştir.
[60]	Düz plaka Mono-kristalli sırlı camlı Bi-PV/T	%13,11	%30	%43	Delhi	Kanallı sistem kanalsıza göre %9.8 daha fazla elektrik enerjisi üretmiştir.
[61]	Düz plaka mono kristalli çift sırlı camlı, çift su/hava geçişli PV/T sistemi	%19,95	%70,09 %39,8 %70,6	%89	Malezya 9 saat	800 W/m^2 ışınımda 350 W/m^2 ışınımda 350 W/m^2 ışınımda
[62]	Düz plaka Mono-kristalin sırsız BIPVT sistemleri	%8	%40	%48	Tunus 07:00-17.30	Deneysel çalışma sonucu günlük sıcak su ihtiyacının (200 L), % 74'ü PV/T tarafından sağlanmıştır.

Çizelge 2.2. Çalışma akışkanına göre literatürde yer alan PV/T paneller

Yazarlar	Yayının yapıldığı yer	Çalışma akışkanı	Termal verim	Elektriksel verim	Sonuçlar
[63]	İtalya	Hava	%50	%10.5	Nümerik çalışmada çalışma akışkanı olarak hava kullanılmıştır.
[64]	Grease	Hava	%45	%11.8	PV hücresinin açık gökyüzüne kıyasla, hücre sıcaklığının bulutlu ve kısmen puslu günlerde 4.4'den 15.2°C'ye yükseldiğini göstermiştir. Bu durumun verimi de etkilediği saptanmıştır.
[65]	Çin	Hava	%50	%10.6	Sayısal ve deneysel çalışmanın yapılması için statik bir minyatür PV/T sistemi yapılmıştır. Sonuçlar, sistemin, düşük ısı kayıp katsayısına sahip PV/T sistemi ile genişletilebileceğini göstermiştir
[66]	Norveç	Hava	%71.5	%12	Net sıfır enerji dengesi elde etmeye çalışan bir Norveç konut binası için PV/T sistemlerinin bir simülasyon çalışması yapılmıştır.
[67]	Güney Kore	Hava	%23	%15	Deneysel çalışmada havalı PV/T performansı incelenmiştir. Giriş havası ön ısıtmalı olarak ısı geri kazanım ventilasyonuna iletilmiştir. Çıkış Sıcaklığında iyileşme saptanmıştır.
[68], [69]	Avustralya Kanada	Hava Hava	%48	%16.4	Hava veya suyun çalışma akışkanı olarak kullanıldığı BIPV/T sistemlerinin, evleri ısıtma amaçlı enerji verimli değerlendirilmesi sonucunda BIPV/T'nin her zaman BIPV'den verimli olduğunu göstermiştir.
[70]	Kanada	Hava	%48	%16.5	BIPV/T'lerin performansının yeni binalar için tek ve çoklu girişli bir sayısal karşılaştırması yapılmıştır. Veriler, rüzgâr ve soğuk kış koşullarına sahip bir ortamdan alınmıştır. Sonuçlar, çoklu giriş BIPV/T sistemi ile % 1 (120 kW) daha fazla elektriksel verime ve %24 termal verim elde edilebileceğini göstermiştir.
[71]	Çin	Hava	%28	%7.7	Değişken iklim koşulunun sistem performansı üzerindeki etkisini bulmayı amaçlamıştır
[72]	UK	Hava	%54	%13,9	Çalışmada, akıllı pencere sisteminin PV (BICPV) çevre şartlarından nasıl etkilendiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, sistem yansıtıcılığının çevre sıcaklığının %10'undan %50'ye kadar çıkabileceğini ortaya çıkardı.

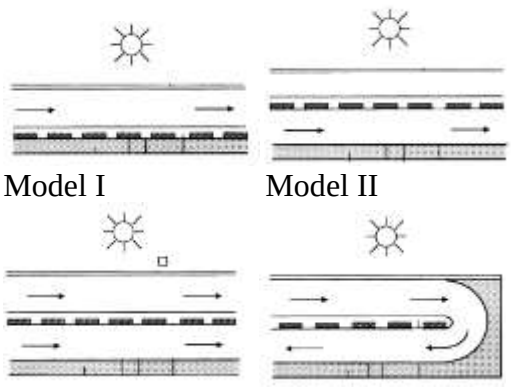
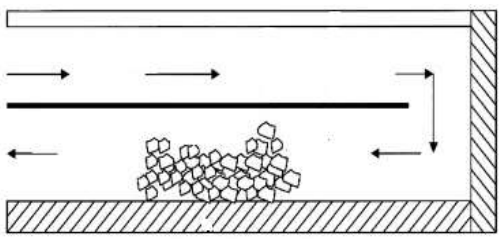
Çizelge 2.2. (devam) Çalışma akışkanına göre literatürde yer alan PV/T paneller

[73]	Tunus	Hava	%50%	%15%	Yazarlar, Tunus evleri ve binalarındaki PV/T güneş sistemlerini kullanımını deneysel olarak incelemişlerdir.
[74]	Malezya	Hava	%56	%13.75	PV/T panelde, ısıyı homojen dağıtmak için ince dikdörtgen kanatçık kullanılmıştır.
[39]	Grease	Su	%70	–	PV/T panelde iki tip güneş paneli (polikristal ve amorf silikon) kullanılmıştır. Güneş panelinin su ile tüm durumlarda (havaya kıyasla) daha iyi soğuduğu görülmüştür.
[58]	Malezya	Su	%55–62	%11.4	PV/T'de polikristal tipteki güneş paneli kullanılmış, çalışma akışkanı olarak su kullanılmıştır.
[75]	Bangladeş	Su	%30	%9.25	Farklı kanatçık yapılarının PV/T verimliliği üzerindeki büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür.
[76]	Hindistan	Su	%57.9	%8.16	Sistemin elektriksel verimliliği, soğutma olmadan % 7,58; soğutma ile % 8,20 olarak ölçülmüştür.
[77]	İran	Su	%54.7	%9.7	Araştırmada, İran'daki üç kentte PV/T panelin ekserji ve ekonomik analizi incelenmiştir
[78]	BAE	Su	%60–70	%15–20	Deneyler baharda-Nisan'da yapılmıştır. PV/T'den elde edilen gücün, bireysel PV'den % 15-20 daha fazla olduğu görülmüştür.
[79]	Hindistan	Su	%68.2	%12.9	Özel bir ısı eşanjörünün (spiral akışlı PV soğurucu) bir PV/T sisteminin performansına etkisini değerlendirmek için deneysel testler yapılmıştır.
[80]	Cezayir	Su	%42	–	Araştırmacılar, PV panel sıcaklığını düşürmek ve evsel kullanım amaçlı sıcak su elde etmek için eşanjörde su sirkülasyonunu yapmışlardır.
[81]	Malezya	Su	%90	%8.88	TRNSYS ile tasarlanan PV/T'nin verimi Mart ayında maksimum, Temmuz ayında minimum değerlerine ulaştığı görülmüştür.
[82]	Hindistan	Su	%71.4	%12.4	Yazarlar, PV/T'de spiral akışlı bir ısı eşanjörü ile alüminyum levhaların düz reflektörlerini kullanmışlardır. Çalışmada, ısı eşanjörü üzerinden 0.042 kg/s'lik bir debi ile su sirkülasyon sağlamışlardır.

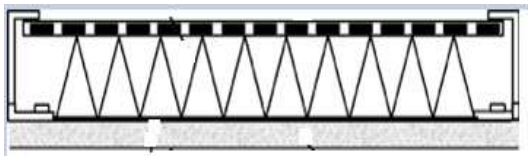
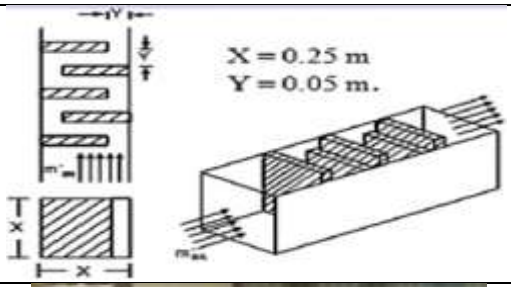
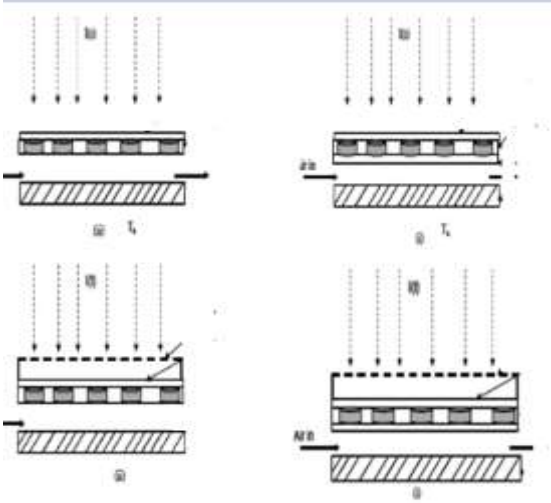
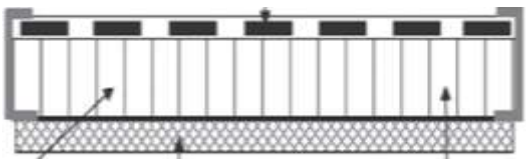
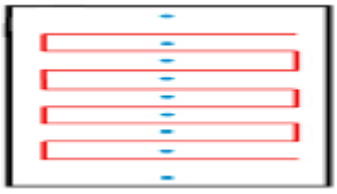
Çizelge 2.2. (devam) Çalışma akışkanına göre literatürde yer alan PV/T paneller

[83]	İtalya	Su	%62	%13.19	c-Si güneş paneli kullanılmıştır. PV ve PV/T sistemler İtalya'da iki bölgede Sicilya ve Pisa'da test edilmiştir.
[84]	Ürdün	Distilasyon	%57	%13.20	Damıtma işlemi için simülasyon çalışması yapılan PVT'nin verimi %57 olarak test edilmiştir. Ayrıca, PVT'yi etkileyen diğer değişkenlerin (solar radyasyon, rüzgar, çevresel koşullar vb.) etkisi incelenmiş ve öneriler geliştirilmiştir.
[85]	İran	Nanofluid	%55	%13.2	CFD ile saf su, Ag-su ve Alümina-su nanofluid olan üç tip sıvı kullanmıştır. Nanopartiküllerin hacimsel oranının artırılması ile verim ve ısı transfer katsayısını artırdığı görülmüştür. Elde edilen maksimum ısı transfer katsayısı en yüksek Ag-su nanofluid kullanımındaki artış saf sudan % 28-45 daha yüksektir.
[86]	Malezya	Nanofluid	%81.73	%13.5	Soğutma suyuna nano akışkanların (SiO_2, TiO_2 ve SiC) ilavesi ile verimin değişimi incelenmiştir. SiC nanofluidli PV/T panelin veriminin en yüksek olduğu görülmüştür.

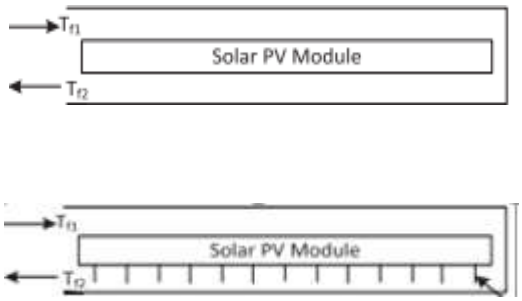
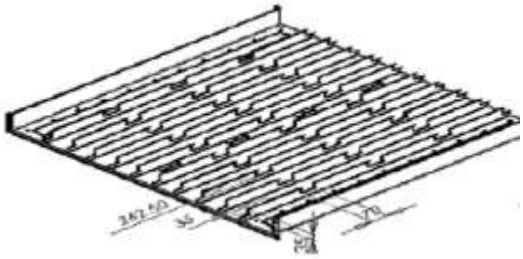
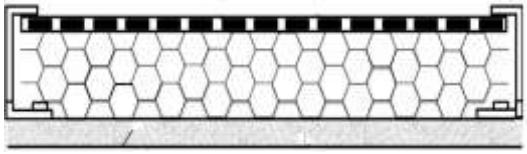
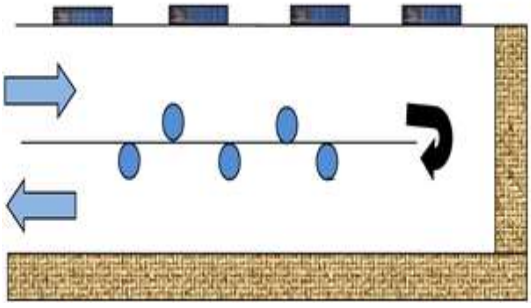
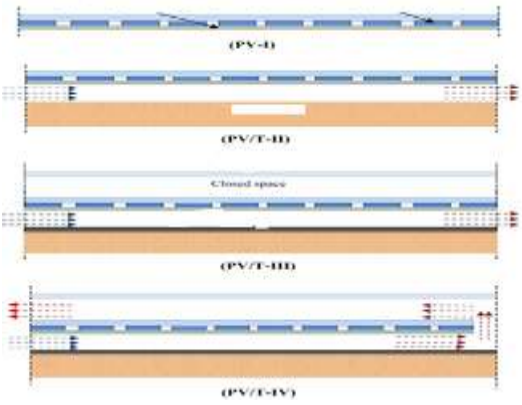
Çizelge 2.3. Literatürde yer alan farklı kanatçık yapısına sahip PV/T'ler.

Çalışmada kullanılan kanatçık tipi	Uygulama şekli
	Hegazy, [43] çalışmasında dört faklı kanatçık yapısına sahip PV/T'yi deneysel olarak test etmişlerdir. Bu modeller içinde en yüksek ve en düşük modelleri sırasıyla III ve I numaralı modelin olduğunu saptamışlar. Model I, II, III, IV 'e ait Termal ve elektriksel verimler sırasıyla %48,9; %55,7; %57; 56,9 ve %7,6; %7,6; %7,7; %7,7'dir. Debi arttıkça, termal verimin arttığı, fan için harcanacak enerji artacağından, ortalama verimin ise düştüğünü gözlemlemişlerdir. Verimin 0,02 kg/s debiye kadar artarken, 0,04 kg/s'ede ise keskin bir düşüşe geçtiğini tespit etmişlerdir. Deneyler Haziran aylarında yapılmış. Rüzgâr 0,5-1,5 m/s ve solar radyasyon maksium 350 W/m^2 olan ortamda yapılmış. En yüksek verim 0.02 kg/s debide ve model III'te olduğu gözlemlemişlerdir.
	Sopian ve diğ., [87] Alt kanalda gözenekli ortamlı çift geçişli PV/T sisteminin verimini deneysel olarak incelemişlerdir. Alt kanala gözenekli ortamın eklenmesiyle, ısı transferinin artmasıyla dolayısıyla sistemin termal verimliliğinin de artmasına yol açtığını (%60 ila %70) tespit etmişlerdir. Bu tasarımın kurutma için uygunluğunu belirtmişlerdir. Kütle debisi, 0.03 kg/s ila 0.07 kg/s arasında değişmektedir. Porozite oranı her deney seti için değiştirilmiştir.

Çizelge 2.3. (devam) Literatürde yer alan farklı kanatçık yapısına sahip PVT paneller

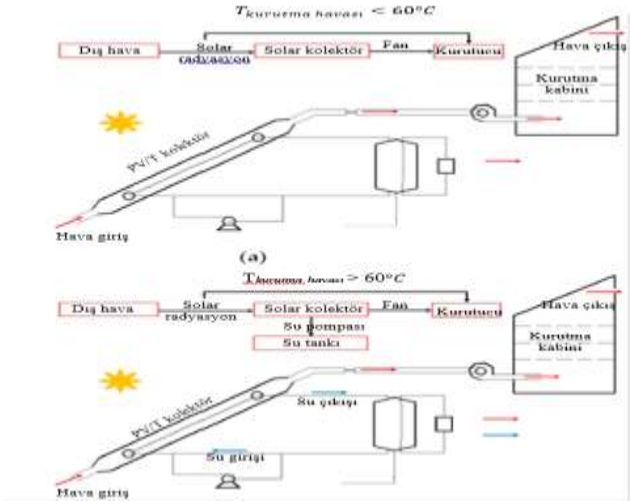
	Othman ve diğ. [61] çalışmalarında Alüminyum ∇-yivli emici plaka ile tek geçişli PV/T sisteminin performansını incelemişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, ∇-yivli emici plakanın (7mm, alüminyum) eklenmesi, elektrik verimliliğinin %1, termal verimliliğin %30 arttırmıştır. 80W'lık panel, ortalama 817 W/m^2 ışınım ve 695.8x10^{-4} kg/s debide Laboratuar şartlarında deneysel olarak test etmişlerdir.
	Sukamongkol ve diğ.[20] deneyler 3 gün için absorber plakanın sıcaklıkları ölçülerek yapılmıştır. Kanatçık kullanılarak yapılan deneylerde aktarılan ısı miktarının arttığı tespit etmişlerdir. Ayrıca, nemi gidermek için kondenserden ısı geri kazanımlı olarak yapılan PV/T'nin kullanımıyla %18 oranında tasarruf sağlanacağını tespit etmişlerdir. 25°C'de, 0.01 kg/s debide, elektriksel ve termal verimler %6.46 ve %66 olarak elde etmişlerdir.
	Solanki ve diğ. [88] seri bağlı PV/T sistemi test etmişlerdir. Giriş havası sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki fark arttıkça termal ve elektrik verimleri sırasıyla %42,5'ten %42'ye ve %7,9'dan % 2,3'e kadar düştüğü belirtilmiştir. Ortalama 600 W/m^2 ışınım ve 0,01 kg/s debide PV panel sıcaklığı 62°C sıcaklıkta iken elektriksel verim %9,3; 72°C 'de % 8,9 ve 81°C'de % 8,7 olarak belirtmişlerdir.
	Dubey ve diğ. [89] çalışmalarında, akışlı ve akışsız güneş panelinin elektriksel verimliliği için analitik ifadenin geliştirilmesi için bir çalışma yapılmıştır. Cam ve kanala sahip sistemlerin verimi, kanalsız olanlara göre %0,66 daha verimli olduğu saptanmış. Cam-cam kanallı olanın verimi daima tedlardan daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni cama düşen radyasyonun diğer camdan geçirilerek ısıyı arttırmasıdır. Ancak tedlar kullanımı ısıyı iletimle hapsedeceğinden verim düşecektir. Tedlar olması durumunda PV panelin sıcaklığı daha yüksek olduğundan verimi düşüktür. Güneş panellerinin dört farklı konfigürasyonu; A (cam-cam, kanallı), %11,00 B (cam-cam kanalsız), %10,20 C (Cam-tedlar kanalı), %10,76 D (Cam-tedlar kanalsız), %10,29
	Jinve diğ. [90] Dikdörtgen tünel ısı değiştiricili tek geçişli havalı PV/T'nin performansını *817 W/m^2 0.0287 kg/s, 25*°C'de değerlendirmişlerdir. Dikdörtgen tünelin malzemesi alüminyum olarak seçilmiştir. Sonuçlar tünelli PV/T sisteminin geleneksel PV/T'ye kıyasla daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Elektrik verimi ve ısıl verimi, sırasıyla %10.02 ve %54.70 olarak tespit etmişlerdir.
	Golzari ve diğ., [91] verimin arttırılmasında fanların sadece absorber sıcaklığını değil, aynı zamanda çıkış havası sıcaklığını da azaltmıştığını tespit etmiştir. Bu nedenle, fanın etkisi PV/T'nin verimliliğinin arttırılmasında tamamen etkili olmayacağını söylemişlerdir.

Çizelge 2.3. (devam) Literatürde yer alan farklı kanatçık yapısına sahip PV/T'ler.

	Kumar ve Rosen. [92] Çift geçişli, PV/T'nin çeşitli debilerde ve farklı solar ışınımdaki tepkilerini araştırmıştır. Sistemin performansını kanatlı ve kanatsız olarak değerlendirmişlerdir. Kanatçıklar sayesinde sistemin, termal ve elektriksel verimlilikleri sırasıyla %15,5 ve %10,5 oranında artmıştır. Alt kanalın verimlilik üzerindeki etkisinin üst kanaldan daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir. 25°C, 800 W/m^2, 0,06 ve Kanatlı iken termal %56, elektrik %15, genel %66; Kanatsız iken termal %44, elektrik %14, genel %55. En yüksek verim 0,12 kg/s de elde edilmiş.
	Teo ve diğ. [37] güneş panelinden elektrik verimliliğini arttırmak için aktif bir soğutma sistemine sahip bir PV/T panel tasarlamışlardır. Güneş panellerinin arkasına giriş/çıkış manifoldları olan paralel bir kanal dizisi eklenmiştir. Deneylerden çıkan sonuç, soğutma sisteminin sistemin elektrik verimliliğini% 8-9'dan % 12-14'ye çıkarmıştır. Ortalama 1000 W/m^2, 0.55 kg/s, 68°C'de elektrik verim %8.6; 38°C'de elektrik verim %12,5 olarak tespit edilmiştir.
	Hussain ve diğ. [93] PVT sistemini bal peteği kanatçıklı ve kanatçıksız olarak test etmişlerdir. Deney sırasında debi 0.02 kg/s'den 0.13kg/s'ye çıkarılmıştır. Sistemin ısıl verimini 0.11 kg/s'lik kütle debide %87 olarak bulmuşlardır. Güneş panellerinin elektriksel verimliliği, her iki sistem için neredeyse aynıdır. Tasarımın, bir solar kurutma sistemi daha fazla araştırması için uygunluğunu belirtmişlerdir.
	Othman ve diğ. [61] yaptıkları deneysel çalışmada, aynı anda iki adet akışkanla soğutulan PV/T performansını incelememişlerdir. Sistemde üretilen başlıca bileşenler; çift geçişli düz plakalı hava kolektörü, bakır su borusu ve bir depolama tankı oluşturmak üzere paralel olarak bağlanan iki şeffaf güneş panelidir. Her iki kanalda güneş pili sıcaklığı, su sıcaklığı ve hava sıcaklığı üzerindeki deneysel değerler ölçülmüştür. Sistemin performansı, 800 W/m^2 radyasyon, 0.05 kg/s'de hava debisi ve 0.02 kg/s'de su debisi; çıkış sıcaklığı, 27.4°C olarak tespit edilmiştir. Bu, genel denemenin en iyi sonuçlarıdır. Elde edilen elektrik verimi,%17, termal verim % 76 olarak belirtilmiştir. Ortalama elektrik gücü 145 W olarak belirtmişlerdir.
	Slimani ve diğ,, [94] dört adet PV/T panel arasında karşılaştırmalı bir çalışma sunmuştur: Bunlar, fotovoltaik modül (PV-I), konvansiyonel hibrid güneş hava paneli (PV/T-II), sırlı hibrid güneş hava kolektörü (PV/T-III) ve sırlı çift geçişli hibrit güneş hava toplayıcı (PV/T-IV)'dır. Sayısal bir model geliştirilmiş ve literatürdeki sonuçları ile doğrulanmıştır. Genel enerji verimliliği, güneş panellerinin üzerine bir cam ve termal yalıtıcının üzerine emici plakanın eklenmesiyle arttığı ve bir çift akışkan dolaşımda da önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir. PV/T-II en düşük elektrik verimliliğine; PV/T-IV en yüksek enerjiye sahip olduğu belirtilmiştir.

2.8. Fotovoltaik Termal Panele Entegreli Kurutma İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Wengang ve arkadaşları [95], hibrid güneş kurutucudaki limon dilimleri için kurutma deneylerini, açık güneşte kurutma deneyleri ile karşılaştırılarak gerçekleştirmiştir. Sistemin nerji, ekserji, ekonomik ve çevresel maliyet (4E) analizini belirlemişlerdir. Sonuçlar, aynı deney koşulları altında, hibrid güneş kurutucunun kurutma kapasitesinin daha güçlü olduğunu göstermektedir [95].



Şekil 2.3. Kurutma entegreli PV/T sisteminin şematik diyagramı [95].

Barnwal ve Tiwari [48], 100 kg kapasiteli PV/T panel entegreli sera kurutucuya fan entegre edip zorlanmış taşınım ile kurutma sağlanmıştır. Kurutulan üzümlerin kalitesinin belirlenebilmesi için açık güneşte kurutulanlar ile karşılaştırılmıştır. PV/T entegreli kurutucu ile kurutma imkanı sağlanmış ve daha kaliteli ürün eldesi sağlanmıştır [48].



Şekil 2.4. PV/T kolektörlü sera kurutuculu sistem [48]

Tiwari ve Tiwari [96], PV/T panel ile entegre edilmiş bir sera tipi kurutucuyu Hindistan'ın iklim koşullarında deneysel olarak test etmiştir. Kurutma sistemi için termal modelleme yapılmış ve ürün sıcaklığı, sera sıcaklığı, toplayıcının çıkış havası sıcaklığı ve hücre sıcaklığı gibi farklı parametreler için analitik ifadeler elde etmişlerdir. Ayrıca kütle akış hızı ve hava toplayıcı sayısının, termal ve elektriksel verime, termal ekserji verimliliğine ve toplam verime olan etkisini hesaplamışlardır.



Şekil 2.5. Kısmen kapalı PV/T'li kurutma sistemi [96]

Tiwari ve Tiwari [97], güneş enerjili PV/T kurutuculu bir sistem tasarlamış ve imalatını yapmışlardır. Farklı iklim koşullarındaki karışık moddaki PV/T-kurutucu entegreli sistemin termal analizi de MATLAB programında yapılmıştır. Deneysel sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış ve uyumluluk içinde olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Hibrit kurutuculu sistemi [97]

Tiwari ve ark. [98], kurutma odası entegreli havalı PV/T panelin kombinasyonunu araştırmıştır. Ayrıca, PV/T panele entegre sera tipi kurutma sisteminin termal modellemesi ayrıntılı olarak sunulmuştur. PV/T panelin ortalama termal, elektrik ve toplam verimliği, 0,01 kg/s debide sırasıyla %26,68; %11,26 ve %56,30 olarak bulunmuştur. PV/T entegreli kurutma sisteminin, farklı ürünler için (farklı sıcaklıklarda) kullanılabileceği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, araştırmacılar ve bilim adamları için farklı hibrid güneş sistemleri için termal modeller geliştirmeleri için çok yararlı olabileceğini savunmuşlardır [98, 99].

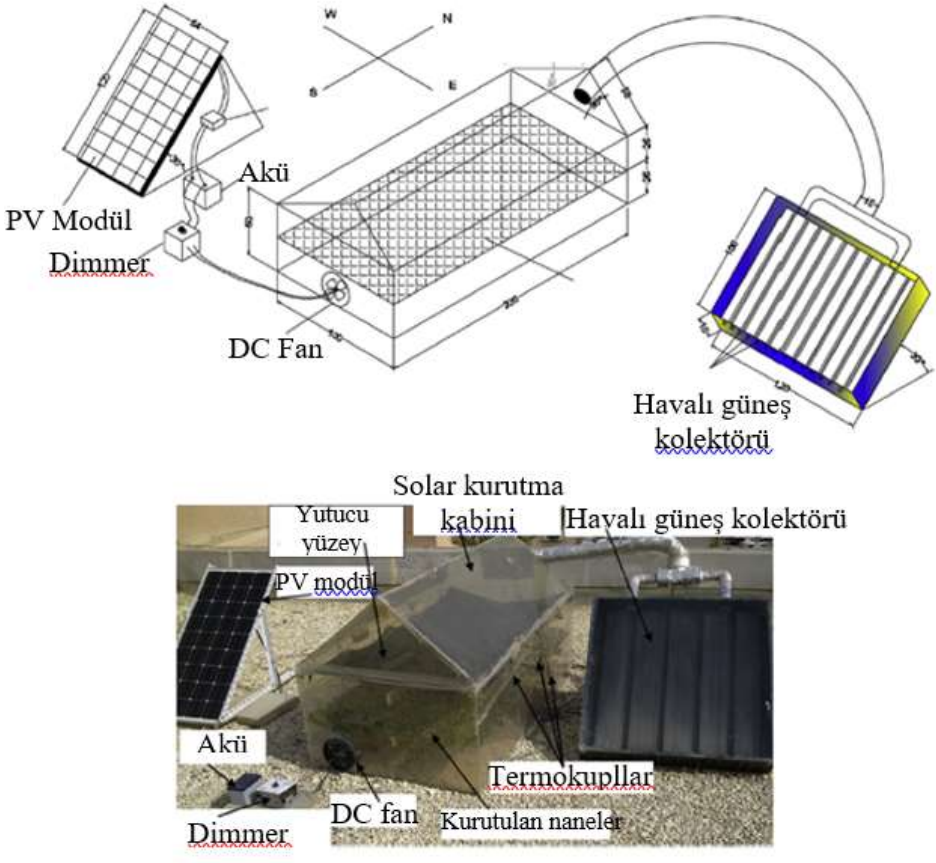
Assoa ve ark. [100], geliştirdikleri sayısal ve deneysel sonuçlarını karşılaştırmış ve PV/T'yi etkileyen her bir parametreyi (camın geçirgenliği, hava kanalının boyutları vs.) ayrı ayrı incelemişlerdir. Geliştirdikleri model sayesinde sonraki adım olarak ürettikleri havanın bağıl nem analizi yapılarak kurutmada kullanılabilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.7. Brigitte ve ark. yaptığı çalışmanın deney setinin görünüşü [100].

Eltawil ve ark. [101], yaptığı çalışmada, hibrid portatif güneş tüneli kurutucusunu geliştirmeyi ve nane kurutmak için güneş fotovoltaik sistemi ve düz plaka güneş kolektörü kullanarak performansını artırmayı amaçlamışlardır. Fotovoltaik sistem, eksenel doğru akım fanını çalıştırmak için kullanılmıştır. Ayrıca, güneş tüneli kurutucu nanenin doğrudan radyasyona maruz kalmaması için termal perde ile donatılmıştır. Güneş tüneli kurutucu performansı tek, çift ve üç kat nane kullanılarak değerlendirilmiş ve açık güneş kurutma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş güneş tüneli kurutucusu kullanılarak nane yapraklarının öngörülen ve deneysel nem oranı, çeşitli ince tabaka kurutma modelleri ile

karşılaştırılmıştır. Geliştirilen hibrid güneş tüneli kurutucusunun somutlaştırılmış enerjisinin çevre üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, geliştirilmiş kurutucu için nane kurutma süresinin 210 ila 360 dakika arasında, açık güneşte kurutma için 270 ila 420 dakika arasında değiştiğini gösterdi. Düşen oranda nane kurumasının gerçekleştiği görülmüştür. Günlük ortalama fotovoltaik verim %9,38, kurutucu verimi %30,71 olarak belirlenmiştir. Geri ödeme süresi 2,06 yıl ve ömür boyu net karbondioksit (CO_2) azaltımı 31,80 ton olarak hesaplanmıştır. Güneş tüneli kurutucuda siyah termal perde kullanılarak kurutulmuş nane kalitesi, doğal renk olarak açık güneşte kurutulandan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Böylece görünümün yani kurutulan ürünün renginin gölgelendirme altında daha fazla korunduğu tespit edilmiştir. Bu sistem, şebeke bağlantısının bulunmadığı ve çiftçilerin talebini karşılayabildiği için oldukça yararlıdır [101].



Şekil 2.8. Hibrid portatif güneş tüneli kurutucusu sistemi [101]

3. KURUTMANIN TEMELLERİ

Bu bölümde kurutulan ürün için gerekli aşamalar dikkate alınarak, kurutma tekniği, kurutma testleri, kurutucu seçimi, kurutmanın iç ve dış şartları gibi temel adımların kurutma açısından önemi ve kurutulacak ürüne etkisi araştırılmıştır.

3.1. Kurutma Tekniği-Farklı Tipteki Kurutma Teknikleri

Kurutma, kelime manasıyla maddenin içerdiği nemi, farklı yöntemlerle üründen uzaklaştırma işlemi olarak tanımlanabilir. Kurutma yapılırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli etkenlerin başında kuruma süresi gelmektedir. Kurutulan ürünün uzun süre fırında kurutulmaya bırakılması hem enerji hem de zaman bakımından tercih edilmez.

21.yy.'daki teknolojik gelişmeler birçok alanda yeniliklere neden olduğu gibi kurutma alanında da yapılan yenilikler göze çarpmaktadır. Bunların başında ise kuruma süresini en aza indiren infrared ile kurutma popüleritesini artırmıştır. Kızılötesi ışınımlı kurutmada gerekli olan ısı çevre kurutma odasındaki havayı ısıtmadan doğrudan ürün içerisine nüfuz eder. Ürün içerisine gönderdiği titreşimler sayesinde ürün bünyesinde ihtiva edilen suyun kısa sürede dışarıya çıkışını sağlayarak kontrollü bir şekilde kurumasını sağlar. Kızılötesi ışınımlı kurutma, geleneksel kurutma sistemlerine göre kısa zamanda kuruma yapması, yer tasarrufu sağlaması ve enerji sarfiyatını düşürmesi gibi birçok avantajları ile dikkat çekmektedir. Kızılötesi ışınımlı kurutucular ile kontrol edilebilir sıcaklıklarda kurutma yapıldığından dolayı hem zamandan hem de harcanan enerjiden tasarruf edilebilmektedir [102].

3.2. Kurutucu Sistem Seçimi

Kurutma sistemlerinin seçiminde en önemli etken, ürünün en kısa sürede en az maliyetle ve sağlıklı bir biçimde kurutulmasıdır. Bir kurutma sistemi seçilirken seçilen sistemin ekonomik ve sağlıklı olabilmesi için uygun kurutucuların incelenmesi, değişik tipteki kurutucuların yatırım ve işletme maliyetleri gibi ön maliyetlerinin tespiti ve kurutma esnasında ve kurutma sonrasında ürünlerde renk ve kalitelerinin belirlenmesi gereklidir. Değişik ihtiyaçlar kurutucunun tasarım esaslarını belirler. Örneğin ürünün kurutucuda taşınması çok önemli olup, kurutucuda kalma süresiyle yakından ilgilidir. Ürünün

başlangıçtaki durumu (sıvı, pasta, katı, toz, granüller, levha vb.) tasarım esaslarında büyük etkiye sahiptir. Çizelge 3.1'de bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri verilmiştir. Çizelge 3.2.'de ise kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan kg başına harcanan enerjiler verilmiştir.

Bu çalışmada, güneş enerjili PV/T panele entegre edilebilecek en uygun kurutucu seçimi yukarıdaki esaslara göre belirlenmiştir. Ürünün kısa sürede ve kaliteli kurutulmasını sağlamak için infrared enerjisinden yararlanılmıştır.

Çizelge 3.1. Bazı türlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri [103, 104]

Malzeme Cinsi	Kurutma Sıcaklıkları (°C)	Hafta	Gün	Saat
Meşe Tahtaları	32-52	1-4		
Yumuşak Tahtalar	70-105		2-14	
Tuğlalar	77			30
Kahve	50-72			12-48
Kauçuk	36-60		2-6	
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65-92			4-20
Meşin ve Köseleler	26-38		2-6	
Meyveler	55-80			6-24
Üzüm	60-65			24
Elma	70-78			8
	74			
Şeftali, Armut	68			24-30
Şerbetçi Otu	50-65			6-12
Sebzeler	50-65			2-18
Havuç	70			14-24
	65			
Mantar	44			
	65			
Soğan	70-88			10-15
	55-60			
Deriler	21-32			2-150
"Fırın Boyaları	105-175			¼-6
Sabun	38-52			12-72
Tütün yaprakları	29-55			12
Çay yaprakları (Fanaj ve ilk yapraklar)	38			4-8
Çay yaprakları (Kurutma)	70-110			1-2

3.3. Ürünlerde Suyun Önemi Ve Denge Nemi

Tüm gıdalar su içermekte ve özellikle yüksek oranda su içeren gıdalarda biyolojik ve kimyasal bozulmalar daha kolay olmaktadır. Birçok gıda maddesi, suyu değişik şekillerde absorbe ederler. Gıda içerisinde oluşan su ile ilgili değişimlerin, mikrobiyolojik gelişmelerle, enzimatik etkileri ve su aktivitesine bağlı olduğu bilinmektedir. Bu bakımdan gıdalarda niteliği bozucu etkilerde su aktivitesinin önemi oldukça önemlidir [104]. Suyun buharlaşmasına etki eden faktörleri sıcaklık derecesi, kurutucu havanın nemi ve hızı, üründe

maksimum yüzey alanı, geometrik şekil (parça büyüklüğü, şekli, kalınlığı), kurutma ortamının basıncı (atmosferik, vakum) gibi fiziksel faktörler olarak sıralamak mümkündür [105]. Gıda ürünlerinden suyun uzaklaştırılması için harcanan enerji miktarları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Üründe kg başına uzaklaştırılan su için harcanan enerji miktarı [103, 104].

Kurutucu Tipleri	MJ/kg Uzaklaştırılan su
Isı Pompalı Kurutucu	0.5-0.8
Direkt egzoz gazları ile çalışan kurutucu	3.2-3.8
Hava ile çalışan kurutucu 70-100 °C	4.5-5.5
Kazandan alınan Egzoz gazları ile kurutma (400°C)	5.0-6.0
Kazandan alınan Egzoz gazları ile kurutma (200°C)	9.0-12.0
Bantlı ve tünel kurutucular	
Ters akışlı tepsili-bantlı	8.0-16.0
Ters akışlı raflı-tünel	6.0-16.0
Arasından akışlı tepsili-bantlı	5.0-12.0
Vakumlu tepsili-bantlı-levhalı	3.5-8.0

Nem içeriği belli bir gıda maddesi, sıcaklığı ve bağıl nemi sabit bir ortamda yeterli bir süre bekletilirse, havadaki su buharı basıncıyla gıda maddesi tarafından tutulan suyun buhar basıncı arasındaki farka bağlı olarak, gıda maddesi nem alır veya nem verir. Denge halinde, gıda maddesinde gözlenen ağırlık değişimi durur. Bu durumda gıda maddesi tarafından tutulan suyun buhar basıncı, havadaki su buhar basıncına eşittir. İçinde bulunduğu hava ile denge halinde bulunan gıda maddesinin içerdiği nem miktarına "denge nemi", denge halindeki gıda maddesine çevreleyen havanın bağıl nemine de "denge bağıl nemi" denir [106, 107]. Bir gıdanın su aktivitesi, onun mikrobiyolojik veya kimyasal-biyokimyasal yollarla bozularak kalitesini kaybetmesi üzerinde rol oynayan önemli bir faktördür. Su aktivitesi (a_w), gıda maddeleri tarafından tutulan suyun özelliğini gösteren bir terimdir ve gıda maddesinin içerdiği suyun buhar basıncının aynı sıcaklıkta saf suyun buhar basıncına oranı olarak tanımlanır [106, 107].

3.4. Kurutma Yöntemleri

Kurutma sistemlerinin birbirinden farklı olması sebebiyle gıdaların kurutulması sırasında kullanılan kurutma sistemleri, kurutulacak ürünün özelliklerine uygun şekilde olmalıdır. Gelişen teknolojiyle birlikte günümüzde kısa zamanda az yer işgal ederek ürün kurutulması mümkün hale gelmiştir. Günümüzde kullanılan bazı kurutma sistemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

3.4.1. Konveksiyon tipi kurutucular

Bu yöntemde, kurutma için gerekli ısı kurutucu ortamdan (genellikle sıcak hava kullanılır) yaş materyale konveksiyon yoluyla iletilir. Sıcak hava, kurutulan ürün tabakasının üzerinden ya da içinden geçirilir. Bu yöntemin ısıl iletkenliği kontak kurutmaya göre daha düşüktür. Tünel kurutucular (tepsili kurutucular), akışkan yataklı kurutucular, püskürtmeli kurutucular bu yöntemin değişik uygulamalarıdır [108].

Bu tip kurutma yöntemi zaman zaman direkt tip kurutma yöntemi olarak da isimlendirilebilir. Çünkü buharlaşmayı sağlayan akışkan genellikle hava veya sıcak gazlar, kurutulacak malzeme üzerine doğrudan çarptırılır veya temas ettirilir ve buharlaşan nem ortamdan bu hava veya gaz akımı yoluyla uzaklaştırılır. Kurutma odaları, Kabin tipi kurutucular veya tepsili kurutucular, bantlı kurutucular, tünel kurutucular, döner kurutucular, tamburlu kurutucular, düşey silindir kurutucular gibi tipleri konveksiyon tipteki kurutucular mevcuttur [109].

3.4.2. Kondüksiyon veya temas tipi kurutucular

Bu yöntemde kurutma için gerekli ısı enerjisi, kurutulacak materyale, ısıtılmış yüzeylerden iletim yoluyla iletilir. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye değen yaş materyalin ısıl iletimine ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır [108]. Kütlesel temas aracılığıyla ısı transferi olmaktadır, ısı taşınımı dolaylı olmaktadır. Bu yöntemde enerji verimi diğer kurutma yöntemlerine göre %50'ye kadar daha yüksektir. Kapalı bir sistem olması nedeniyle dışarıya atık parçacıklar ve zararlı gazlar vermez bu sayede çevreyi kirletmez. Ayrıca kurutma ortamı olarak havanın kullanılmadığı sürece oksidasyon ve diğer tepkimeler söz konusu değildir.

Düz yüzeyli kurutucular, film kurutucular, silindir kurutucular, vakum kurutucular, dondurarak kurutma, Kızgın buharda kurutma gibi yöntemler kondüksiyon tipteki kurutular olarak sıralanabilir.

3.4.3. Radyasyon tip kurutucular

Bu yöntemde kurutma için gerekli ısı enerjisi, yaş materyale, elektromanyetik alanın kızıl ötesi bölgesinde yer alan ışınlarla iletilir. Bu ışınlar, içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz,

kendini absorbe eden cisimleri ısıtırlar. Kızılötesi ışınların, yaş materyalin üzerinden etkilediği derinlik oldukça az olduğundan, bu yöntem ince film şeklindeki seri tabakaların kurutulmasında kullanılır [108]. Kurutulacak olan ürünün, bünyesindeki nemin atılması için gerekli olan ısı infrared ısı kaynağından gerekli ısıyı alarak kurutma sağlanır. Radyasyon yöntemi ile birim yüzeye transfer edilen ısı yükü konveksiyon yöntemi ile yapılan ısı transfer yükünde fazladır [109]. Mikrodalga kurutma, güneşte Kurutma**,** dielektrik kurutma, ozmotik kurutma gibi tipleri mevcuttur. İnfrared kurutma, radyasyon tip kurutmada aşağıda verilen avantajlarından dolayı en çok tercih edilen kurutma tipidir.

3.4.4. İnfrared kurutma ve İnfrared kurutmanın avantajları

Isının ışıkla taşınma sekli olup, güneş ışınlarının bir kısmına verilen isimdir. İnfrared ışınlarının diğer ışınlardan (sarı, mavi sekli vb.) farkı ise ısıyı diğerlerinden daha fazla taşıyabilmesidir. İnfrared ışınları turuncu renginde olup 0,76-300 mikrometre dalga boyu aralığındadır. İnfared'in en büyük özelliği havayı ısıtmadan doğrudan ürünü ısıtmasıdır. Diğer kurutma tekniklerinde ana enerji kaynağı olarak fosil yakıtların kullanımı hem ürüne hem de hem de çevreye zarar verir. Fosil yakıt kullanılarak yapılan kurutma, kurutma işlemi için gerekli olan ısı enerjisi birincil enerji kaynağından ikincil bir enerji kaynağına aktarılarak sağlanır. İkincil enerji kaynağının sürekli olarak kurutma sıcaklığında tutulması için ek bir enerji, zaman ve işçilik vb. girdilerle maliyet yükselmektedir. Fakat infrared enerjisi birincil enerji kaynağı durumundadır ve doğrudan ışın tarafından görülen yüzeylere ısı transferi olduğundan diğer kurutma yöntemlerine göre infrared enerjisi ile yapılan kurutmaya ekonomik üstünlük kazandırmaktadır.

Meyve ve sebzeler, insan beslenmesinde yaşamsal gerekliliği olan protein ve vitaminlerin karşılanmasında büyük rol oynamaktadır. Genel olarak tüketimi taze ve kurutulmuş olarak yapılmaktadır. Kurutma, yöntem olarak çoğu bölgede güneş altı açık havada yapılmakta, meyve ve sebzenin cinsine göre farklı süreçlerde tamamlanmaktadır. Bu klasik yöntem bazı temel dezavantajları beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajlar; kurutma alanına serilmiş olan ürünlerin tekdüze olarak kurutulamaması, kurutma için geniş alanlara ihtiyaç duyulması, alanın kontrol zorluğu, uzun kurutma süresi, yüksek isçilik girdileri, meteorolojik koşullar ve olumsuzlukları, alanın ve ürünün çevresel kirlenmelerden korunamaması olarak sıralanabilir.

Güneş ışınlarının farklı dalga boylarında olması kurutulan ürünün kimyasal yapısını, rengini ve gıda hijyenini değiştirmektedir [110-112]. Bu olumsuzluklar nedeniyle bazı araştırmacılar tarafından bazı kurutma teknikleri (sıcak hava ile kurutma vb.) geliştirilmiştir. Bazı üstünlüklerinden (kurutma süresi, enerji kullanım etkinliği vb.) dolayı infrared ısı kaynaklarının kurutma amacıyla kullanılabileceği ifade edilmiştir [113, 114]. İnfrared kurutma teknolojisi geleneksel kurutma teknolojisinden daha yüksek enerji etkinliği, daha kısa kurutma süresi ve daha iyi ürün kalitesine sahiptir. Choa ve Chou (2003) ve Sandu (1986) infrared kurutmanın kırsal alanlar için düşük maliyetli bir kurutma yöntemi olduğunu belirtmiş ve düşük yatırım maliyeti, kolay kurulum, ısıtma ve kurutmada yüksek hız, basit ekipman gereksinimi gibi bazı avantajlara sahip olduğunu ifade etmektedirler [115, 116].

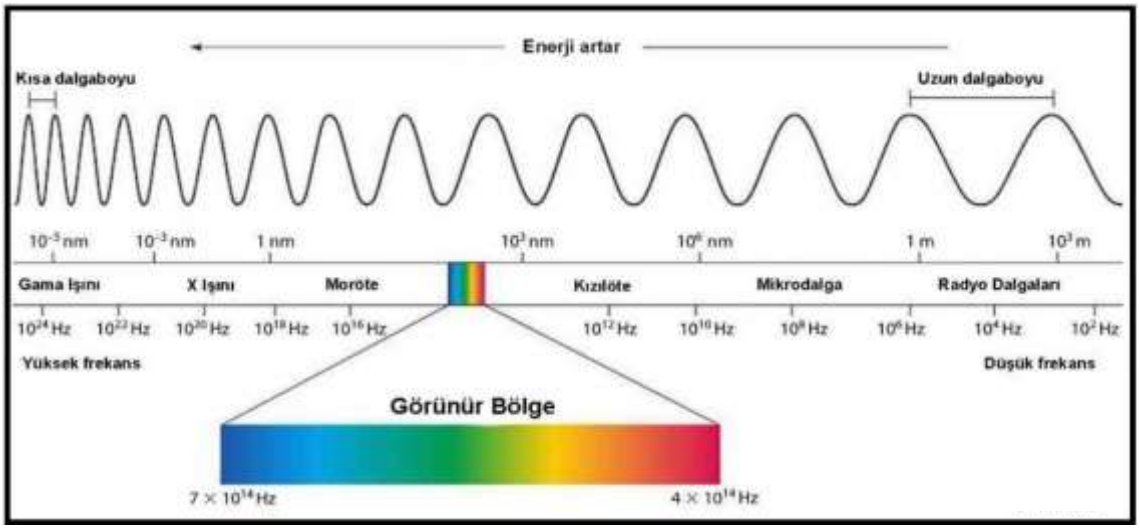
İnfrared kurutma, kurutma sürecini hızlandıran duyulur ısı ilavesiyle kuruma süresinin azalmasında önemli rol oynar. Isı, ürünün yüzeyine ortam havasını ısıtmadan geçer. Çok sayıda araştırmacı infrared kurutmanın avantajlarını kanıtlamışlardır. Bu avantajlar, ısıtıcının yüksek ısı transfer değerine sahip olması, kurutulacak ürün yüzeyine ısı transferinin kolay olması, kurutma sürecinin kolay, hızlı ve kontrollü olmasına olanak sağlaması olarak sıralanabilir. Paakkonen (1999) infrared kurutma ile bitkilerin kalitesinin iyileştiğini göstermiştir ve Dontigny (1992) grafit çamurunun (graphite slurry) infrared kurutulması ile kuruma oranının önemli bir şekilde yükseldiğini kanıtlamıştır. Ton (2001) çalışmasında infrared kurutma ile ürün rengindeki bozulmanın ve kurutma zamanının minimuma azaldığını göstermiştir [103].

Kızılötesi radyasyon (IR), güneşin ısınma etkisinden ağırlıklı olarak sorumlu olan elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır [117]. IR, dalga boyuna göre üç kategoriye sahip elektromanyetik bir dalgadır: yakın kızılötesi (NIR) (0,78μm ila 1,4μm), orta kızılötesi (MIR) (1,4μm ila 3μm) ve uzak kızılötesi (FIR) (3μm) ila 1000μm) [118]. Kızılötesi radyasyonun sudan geçişi, kısa bir dalga boyuna sahip olan NIR'de [119], emilimi ise yüzeyden FIR'da (uzun dalga boyunda) yapılır [120]. Daha kalın cisimlerin kuruması, NIR bölgesi kullanılarak daha verimli gibi gözükmekte iken, ince tabakaların kurutulması FIR bölgesinde daha iyi sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmada, kurutma kabinine entegre olacak şekilde 100W'lık infrared lamba seçilmiştir.

3.5. Kızılötesi Işınım Çeşitleri

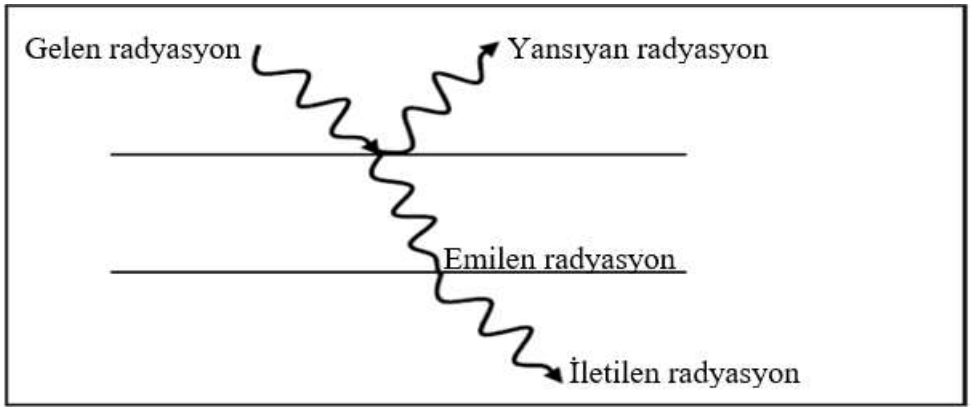
Kızılötesi radyasyon yaklaşık olarak 1 mm ile 750 nm arasındaki dalga boylarını kapsamaktadır. IR radyasyonu, 0.75 ila 1.4 µm yakın kızılötesi (NIR), 1.40 ila 3.0 µm orta kızılötesi (MIR), 3.0 ila 1000 µm uzak kızılötesi (FIR) spektral aralıklarına karşılık olarak gelen 3 bölgeye ayrılabilir [120]. Genel olarak, FIR radyasyonu gıda işlemede avantajlıdır, çünkü çoğu gıda bileşeni FIR bölgesinde ışınım enerjisini absorbe eder [116]. Elektromanyetik Spektrum'da (Şekil 3.2) ışığın dalga boyunun frekans aralıkları görülebilmektedir.



Şekil 3.1. Elektromanyetik Spektrum [116]

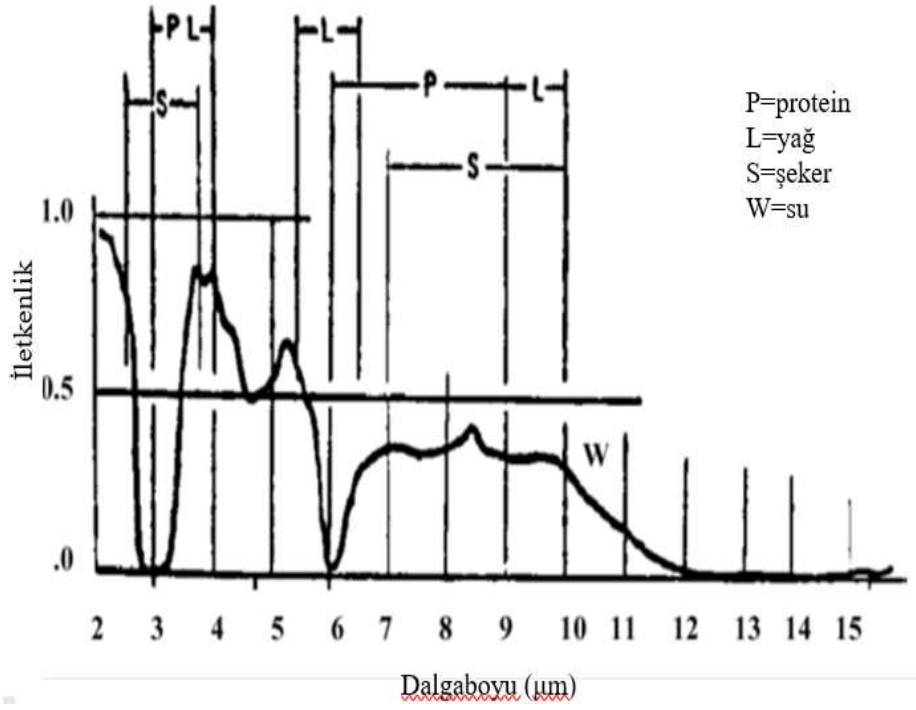
Ürünler kızılötesi radyasyona maruz kaldıkça, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi absorbe edilir, yansıtılır veya saçılır (kara cisim yansıtmaz veya saçılmaz), farklı dalga boylarındaki absorpsiyon yoğunlukları gıda bileşenlerine göre farklılık gösterir. Genel olarak, gıda maddeleri, moleküler titreşim durumundaki değişimler mekanizması yoluyla uzak kızılötesi (FIR) enerjisini en verimli şekilde absorbe eder, bu da radyasyona maruz kalmaya yol açabilir.

Gıdaların ana bileşenleri olan proteinler ve nişastalar gibi su ve organik bileşikler FIR enerjisini 2.5 µm'den daha yüksek dalga boylarında emerler [116, 120], çoğu yiyeceğin 2,5 µm'den küçük yüksek geçirgenliğe (düşük emiciliği) sahip olduğunu bildirmiştir.



Şekil 3.2. Radyasyon sönümlenmesi (absorbsiyon, transmisyon ve refleksiyon) [116].

Temel gıda bileşenleri olan protein, yağ, şeker ve suyun hangi dalga boyu aralıklarında emiliminin sağlandığı Şekil 3.5'te gösterilmiştir [116]. Temel gıda bileşenlerinin su emme spektrumuna kıyasla emme bantları gösterilmiştir. Gıda bileşenlerinin emme spektrumlarının, dikkate alınan spektral bölgelerde birbirleriyle üst üste geldiği görülmektedir. Radyasyonunun emilimindeki su etkisi, tüm dalga boylarında baskındır; bu, hedef gıda maddesi için farklı emicilikleri temel alan seçici ısıtmanın, suyun baskın enerji emiliminin ortadan kaldırılması durumunda daha etkili olabileceği düşünülmektedir. Kimyasal gruplar ve ilgili gıda bileşenleri için kızılötesi absorpsiyon bantları Çizelge 3.3'te özetlenmiştir [121].



Şekil 3.3. Ana gıda bileşenlerinin su ile karşılaştırıldığında başlıca emme bantları [116].

NIR ve FIR radyasyonlarının tatlı patateslere nüfuzu, Hashimoto ve Kameoka tarafından incelenmiştir [122]. Sonuçlar, FIR'ın malzemenin içine 0.26 ila 0.36 arasında bir derinliğe nüfuz ettiğini ve NIR için karşılık gelen değerlerin 0.38 ila 2.54 mm olduğunu göstermiştir. Hashimoto ve arkadaşlarının [122] çalışmasına katılarak, Sakai ve Hanzawa [120], FIR enerjisinin çoğunun malzemenin yüzeyinde ısıya dönüştürüldüğünü belirtmiştir. Yakın kızılötesi radyasyonun bazı gıda ürünlerine nüfuz derinliği Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. NIR ve FIR'ın (0.75-1.4 μm) gıda ürünlerine nüfuz etme derinliği [159, 172].

Ürün	Nüfuz Derinliği (μm)	Nüfuz derinliği (μm)
Hamur, buğday (dough=hamur veya arpa)	1.0	4 ila 6 arası
Hamur, ekmek	1.0	11 ila 12 arası
Ekmek, bisküvit,	1.0	4
kurutulmuş	0.88	12
Hamur, tahıl	1.0	2
Havuç	1.0	1.5
Salça %70 ila %85 nemli	1.0	1
Çiğ Patates	1.0	6
Kuru Patates	0.88	15 ila 18 arası
Elma	1.16	4.1
	1.65	5.9
	2.36	7.4

Çizelge 3.4'te gıda bileşenlerinin ve kimyasal grupların IR emme grubunu sınırlamaları gösterilmiştir [173, 174]. Emilim grubu hidroksi olan grupta su ve karbonhidratların emilim dalgaboyu 2,7 ila 3,3 arasında olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.4. Gıdalar için kızılötesi emilim bandları [173, 174].

Kimyasal Grubu	Emilim dalgaboyu (μm)	Uygun Gıda Bileşiği
Hidroksil Grup (O-H)	2,7 ila 3,3 arası	Su, Karbonhidratlar
Alifatik Karbon-Hidrojen Bağı	3,25 ila 3,7 arası	Yağlar, karbonhidratlar ve proteinler
Karbonil Grubu (C≡O) (ester)	5,71 ila 5,76 arası	Yağlar
Karbonil Grubu (C≡O) (amid)	5,92	Proteilnler
Hidrojen-Hidrojen Grubu (-NH-)	2,83 ila 3,33 arası	Proteinler
Karbon-karbon çift bağı (C≡C)	4,44 ila 4,76 arası	Doymamış Yağlar

Bir materyali kurutmak veya ısıtmak için kızılötesi radyasyon (IR) kullanıldığında, IR yüzey tabakasındaki katı materyal tarafından emilir. Bununla birlikte, radyasyon nemli, gözenekli malzemelerde bir derinliğe nüfuz eder; İletilebilme yetenekleri nem içeriğine bağlıdır [123]. IR kurutucuların enerji verimliliği, kurutucunun ekonomik fizibilitesini belirleyen, malzemenin emme özellikleri ile doğrudan ilgilidir [124]. Kızılötesi kurutma, enerji verimliliği yüksek olan bir dehidrasyon yöntemidir. Bu, IR kurutucusuyla yapılan enerji

tasarrufunun konveksiyonel ve diğer kurutma yöntemlerinden daha fazla olduğu anlamına gelir [125]. Isıtma kaynağı ile malzeme arasındaki mesafeyi göz önüne alarak, havanın akış hızı ve sıcaklığı, malzeme tabakasının hızı (eğer sürekli IR kurutucu ise) enerji verimliliğini önemli ölçüde etkileyebilir [126].

IR kurutma kinetiğini etkileyen faktörler birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Masamura ve diğerleri (1988), radyatörün yüzey sıcaklığı arttıkça patateslerin kurutma oranlarının arttığını doğrulamışlardır [127]. FIR ısıtma işleminin karides dehidrasyonu için optimizasyonu, plaka mesafesinin kurutma hızı üzerindeki etkisinin anlamlı olmadığını tespit etmişlerdir. Kurutma hızı, plaka ve hava sıcaklığındaki artışla beraber artmıştır [128].

Nowak ve Levicki (2004) elma dilimlerinin kızılötesi kurutmasının eşdeğer parametreler altında konvektif kurutmaya göre daha etkili ve daha hızlı bir su giderme yöntemi olduğunu bildirmiştir [126]. IR, soğanlı dilimlerin konvektif kurutulmasını araştırırken, Sharma ve diğerleri (2005), uygulanan tüm kızılötesi güçlerde hava hızındaki artışla kuruma süresinin arttığını; bununla birlikte, kızılötesi gücünde bir artışla azaldı ve kuruma, düşme kuruma hızı döneminde gerçekleşti [129].

Yüksek verimli ısı transferinde, kızılötesi radyasyonun emilimi doğrudan ve toplam olmalıdır. Bu kavram, yalnızca enerji kaynağı ile ürün arasında emici bir ortam bulunmadığında ortaya çıkar. IR enerjisinin transferi çevre havayı ısıtmadan yapılır ve IR kurutucularında enerji kaynağı ile malzeme arasında hiçbir ısıtma aracına ihtiyaç duyulmaz. Bu nedenle hızlı ve homojen bir ısıtma olduğundan IR kurutmanın enerji tüketimi diğer kurutma yöntemlerine göre daha düşüktür [122, 130, 131].

IR sıcaklıkları, ürünlerin yüklenmesini önlemek için tipik olarak 650°C ila 1200°C aralığında kullanılır. Gaz ısıtıcılarının sermaye maliyeti daha yüksektir, işletme maliyeti ise elektrikli kızılötesi sistemlerden daha ucuzdur. Elektrikli kızılötesi ısıtıcılar, kurulum kontrol edilebilirliği, hızlı ısıtma hızı üretme kabiliyeti ve daha temiz ısı biçimi nedeniyle popülerdir. Elektrikli kızılötesi yayıcılar ayrıca belirli bir uygulama için istenen dalga boyunu üretmede esneklik sağlar. Genel olarak, bir elektrikli IR ısıtıcının çalışma verimliliği %40 ila %70 arasında değişirken, gazla çalışan IR ısıtıcıların verimliliği %30 ila %50 arasındadır [132].

Endüstriyel proses ısıtma için uygun spektral bölge 1,17 ila 5,4 μm arasında değişmekte olup, 260 ila 2200°C'ye tekabül etmektedir [133]. Kızılötesi radyasyon, kısa dalga boyunda su yoluyla iletilir, oysa daha uzun dalga boylarında yüzeyde emilir [120]. Bu nedenle, FIR katında ince tabakaların kurutulması daha verimli gibi gözükse de, daha kalın gövdelerin kurutulması NIR bölgesinde daha iyi sonuçlar vermelidir.

Literatürde FIR-NIR radyasyonuna üstünlüğünü araştırmak için çalışmalar da bulunmuştur. Sakai ve Hanzawa (1994), ısıtıcıların ışıma özelliklerinin beyaz ekmek ve buğday unu gibi yiyeceklerin yüzeylerinde kabuk oluşumu ve renk gelişimi üzerindeki etkilerini tartıştılar. Bir NIR ısıtıcı ile radyant ısıtma, FIR numunelerinin oluşturduğu kuru tabakalara kıyasla nispeten ıslak kabuk tabakalarının oluşmasıyla sonuçlanan gıda numunelerinde daha büyük bir ısı emicisine yol açmıştır. Bununla birlikte, FIR ısıtıcıları tarafından renk gelişimi oranı, özellikle yüzeydeki daha hızlı ısıtma hızı nedeniyle, NIR ısıtıcılarında daha büyüktür. Hashimoto ve diğerleri (1990, 1994), FIR enerjisinin tatlı patates içine nüfuz etmesini incelemiş ve sebze modeli tarafından emilen FIR radyasyonunun, yüzey değerinin 0,26 ila 0,36 mm arasında bir derinlikte başlangıç değerlerinin % 1'ine kadar nemlendirildiğini tespit etmiştir. 0,38 ila 2,54 mm derinlikte benzer bir azalmayı NIR'da tespit etmişlerdir. Sakai ve

Hanzawa (1994), FIR enerjisinin penetrasyon derinliğinin gıdanın içindeki sıcaklık dağılımını etkilemediğini bildirmiştir. Ayrıca, FIR enerjisinin çok az nüfuz ettiğini, neredeyse tüm enerjinin, gıda yüzeyinde ısıya dönüştürüldüğünü, Hashimoto ve diğerlerinin (1993) FIR ısıtma tekniğini bir yüzey ısıtma yöntemi olarak değerlendirmesiyle tutarlı olduğunu belirtmişlerdir [120, 122, 134].

Yapılan tüm çalışmaları özetlemek gerekirse, IR gücü arttırıldığında kuruma süresinin azaldığı, hava hızı arttırıldığında ise hem kuruma süresinde artışın gözlendiği hem de enerji tüketiminin arttığı gözlenmiştir.

Hava hızının arttırılması, kurutulacak ürünün yüzey katmanında soğumaya neden olur. Soğuyan yüzey katmanı daha uzun kuruma süresine neden olur. Bu nedenle, daha iyi sonuçlar elde etmek için hava hızının optimum düzeyde olması gerekmektedir. Kızılötesi güç seviyesinin arttırılması kurutma süresini kısaltabilir ancak iyi bir şekilde ayarlanmalıdır aksi halde kalite kaybına neden olabilir. Çizelge 3.5.'te farklı ürünlerin farklı max (μm) dalga boylarındaki nüfuz derinliği verilmiştir [135].

Çizelge 3.5. Bazı ürünlerin Nüfuz derinliği [182].

Ürün	Nüfuz Derinliği (mm)	λmax (μm)
Elma	1,8	1,16
	2,6	1,65
	3,2	2,35
Çavda Ekmeği	3,0	0,88
Buğday Ekmeği	4,8-5,2	1
Kuru Ekmek	1,7	1
	5,2	0,88
Kuru patates	6,5-7,8	0,88
Ham patates	2,6	1
Salça (%85 nemli)	0,4	1

Hebbar ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada kızılötesi kurutma sistemi geliştirilmiştir. Gıda maddeleri 2,5-3,0 μm dalga boyunda maksimum absorbsiyon gerçekleştirebildiğinden, yazarlar çalışmalarında 2,4-3,0 μm dalga boyunda ışınım yapabilen ve yaklaşık 5000 saat ömre sahip olan ve % 80 civarında verime sahip olan quartz malzemesinden imal edilmiş kızılötesi ısıtıcı kullanmışlardır. İnfrared ısıtma ve hava ile kurutmayı birleştirebilmek amacıyla kurutma sistemine dakikada 156 m^3 hava üfleyebilen santrifuj üfleyici ve ısıtıcı da eklemişlerdir. Yalnız kızılötesi ve sıcak hava ve ayrıca kızılötesi ve sıcak havanın beraber kullanıldığı kurutma yöntemlerinin enerji tüketimi Çizelge 3.6'da verilmiştir [131].

Çizelge 3.6. 1 kg suyun buharlaşması için harcanması gereken enerji miktarı (MJ) [136].

Kurutma Operasyonu	Patates	Havuç
Sıcak hava	17,17	16,15
Kızılötesi	7,60	7,15
Kızılötesi ve sıcak hava	6,43	6,04

Çizelge 3.6'dan de görüldüğü gibi kızılötesi enerjisinin sıcak hava ile birleştirilmesi sadece sıcak hava kullanımına göre %63 oranında enerji kazandırmıştır. Ayrıca son ürünün renk ve yüzey sertleşmesi acısından da kalitesi sıcak havaya göre daha iyi olduğu araştırmacılar tarafından gözlenmiştir [135, 136].

Shih ve ark. (2008) tarafından yürütülen bir çalışmada ise taze çilekler 4,1 mm kalınlıkta dilimlenmiş ve kızılötesi ile 3000 ve 5000 W/m^2 sabit ısı akısı altında kurutmaya tabi tutulmuşlardır. Araştırmacılar 3000 W/m^2 ile yapılan kurutmada çileğin 80°C'ye kadar ısınmasının 19,5 dakika sürdüğünü buna karşın 5000 W/m^2 ile 2,5 dakika sürdüğünü gözlemişlerdir. Buradan da açıkça görüleceği gibi son ürünün kalite kriterleri de göz önüne

alınarak optimize edilmiş işlem parametrelerinin seçilmesi zaman ve enerji kazanımı acısından kritik rol oynamaktadır [135, 137].

Sonuç olarak kızılötesi ışınım yüzey ısıtması için oldukça etkili bir yöntemdir. Gıda işleme sanayiinde verimli bir şekilde kullanılabilmesi için, kızılötesi ışınımının mikrodalga ve diğer genel iletim veya taşınım ısı aktarım yöntemleri ile birleştirilmesi gerekmektedir. Son 30 yıldır kızılötesi ışınımı üzerine birçok araştırma yapılmasına karşın, aşağıdaki yöntemler için araştırmaya halen ihtiyaç duyulmaktadır [135]:

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Teorik Analiz ve Tasarım

Güneş panelleri, üzerlerine gelen solar radyasyonu doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Genellikle 0,2-0,4 mm kalınlığından ve 100 cm^2 alana sahip dikdörtgen veya daire şeklindedirler. Güneş panellerinin, güneş radyasyonu emmesiyle uçlarındaki gerilimle elektrik üretilir bu olaya Fotovoltaik ilke denir ve güneş panelleri de bu ilkeye göre çalışırlar. Genel olarak verimleri %15 ila %20 arasındadır. PV hücrelerin seri ya da paralel bağlanmasıyla güneş panelleriler oluşturulur ve güneş panelleriler yardımıyla güç çıkışının artışı sağlanır. Güneş pilleri ince film ve kristal silikon olmak üzere genel olarak iki gruba ayrılabilir. Bu pillerin yapımında günümüzde en çok Kristal Silisyum, Galyum Arsenit (GaAs), Amorf Silisyum, Kadmiyum Tellürid (CdTe), Bakır İndiyum Diselenid ($CuInSe_2$) kullanılmaktadır.

Ülkemizde tarım ürünlerinde üretimi açısından büyük öneme sahip, ticari değeri yüksek iki ürün (nane ve elma) kurutma materyali olarak seçilmiştir. Her iki ürün de mahalli bir marketten alınmış ve muhafaza edilmiştir. Naneler saplarından ayrılarak, elmaların ise rendelenerek kurutulması hedeflenmiştir. Deney setinin yapım aşamasından önce tasarlanan sistemin teorik analizi tamamlanmış ve simülasyon çalışması yapılmıştır. Buna göre, sistem verimini maksimum düzeyde tutacak şekilde, PV/T paneli etkileyen parametreler belirlenmiş ve optimum debi, en uygun kanatçık yapısı, hava giriş kanalının en/boy oranı HAD çalışmaların sonucunda elde edilmiştir. Tüm bu analizler neticesinde PVT panel ve kurutma kabini imal edilmiştir.

4.2. Enerji Analizi

En genel tanımıyla enerji, farklı formlara dönüşerek cisimlere iş yapma yeteneği kazandıran bir özellik olarak tanımlanabilir. Bir sistemin enerji analizi termodinamiğin birinci kanunu ile yapılır. Fotovoltaik sistemlerde, güneş radyasyonun yutucu yüzeye çarpmasıyla ısı ve elektrik enerjisi elde edilir. Bir PV/T güneş paneli elektrik verimliliği termal verimliliğinden çok daha düşüktür. Bu yüzden genel verimi korumak büyük oranda termal verimi korumaya dayanacaktır. Genel enerji verimliliği, enerji sınıfı açısından ısı ve elektrik enerjisi

arasındaki farkı göz ardı eder ve bu nedenle PV/T panellerin kullanıldığı sistemlerde enerji performansını tam olarak doğrulamak için yetersizdir [138].

Çizelge 4.1'de bu çalışma için tasarlanan PV/T panelin bileşenleri ve bu malzemelerin termofiziksel özellikleri yer almaktadır. Buna ek olarak, Şekil 4.1'de PV/T panelin ısıl direnç modelinin şematik gösterimi verilmiştir. Buna göre, radyasyon, taşınım ve iletimle olan ısı transfer katsayılarının her biri ısıl direnç benzeşimi kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. PV/T panelin sistem özellikleri

Sistem bileşeni	Parametre	Simge	Değer	Birim
PV/T Panel	Alan	A_{pvt}	1,6	m^2
	Açı	°	40	-
	Uzunluk	L	1,6	m
	Genişlik	W	0,98	m
	Derinlik	δ	0,09	m
Cam Kaplama	Kalınlık	δ_g	0,004	m
	Özgül Isı Kapasitesi	$c_{pg.}$	500	J/kgK
	Yoğunluk	ρ_g	3000	kg/m^3
	Emisivite	ε_g	0,92	-
	Absorbsivite	α_g	0,05	-
	Termal İletkenlik	k_g	1,8	W/mK
Mono kristal Güneş paneli	Kalınlık	δ_{pv}	0,0003	m
	Özgül Isı Kapasitesi	$c_{p_{pv}}$	677	J/kgK
	Yoğunluk	ρ_{pv}	2330	kg/m^3
	Emisivite	ε_{pv}	0,88	-
	Absorbsivite	α_{pv}	0,95	-
	Termal İletkenlik	k_{pv}	148	W/mK
	Transmisivite	τ_{pv}	0,88	-
	Referans Hücre Verimi	η_{ref}	0,12	-
Kanatçık	Kalınlık	δ_{plate}	0,001	m
	Özgül Isı Kapasitesi	$c_{p_{plate}}$	381	J/kgK
	Yoğunluk	ρ_{plate}	8978	kg/m^3
	Emisivite	ε_{plate}		-
	Absorbsivite	α_{plate}		-
	Termal İletkenlik	k_{plate}	388	W/mK
Yalıtım Malzemesi	Kalınlık	δ_{ins}	0,02	m
	Özgül Isı Kapasitesi	$c_{p_{ins}}$	880	J/kgK
	Yoğunluk	ρ_{ins}	15	kg/m^3
	Emisivite	ε_{ins}	0,05	-
	Absorbsivite	α_{ins}		-
	Termal İletkenlik	k_{ins}	0,041	W/mK

4.2.1. PV/T panelin termodinamik analizi için kullanılan formüller

Cam yüzeyinden çevreye radyasyonla olan ısı kaybının hesaplanması için radyasyon ısı transfer katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Aşağıdaki denklemlerde (4.1-4.3) radyasyonla olan ısı transfer katsayısı, gökyüzü sıcaklığı ve radyasyonla olan ısı kayıp miktarı sırasıyla verilmiştir.

$$h_{rad\,cam\rightarrow gökyüzü} = \varepsilon_{cam}.\sigma.\left(T_{cam}^2 + T_{gökyüzü}^2\right).\left(T_{cam} + T_{gökyüzü}\right) \quad (4.1)$$

$$T_{gökyüzü=}0.0552\ T_{çevre}^{1.5} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q}_{radyasyonkayıp} = h_{rad\,cam\rightarrow gökyüzü}\ A_{cam}\ (T_{cam} - T_{gökyüzü}) \quad (4.3)$$

Cam yüzeyinden çevreye rüzgâr nedeniyle oluşabilecek ısı kaybının hesaplanması için rüzgâr nedeniyle oluşacak ısı taşınım katsayısının ve rüzgâr hızının bilinmesi gerekmektedir. Aşağıdaki eşitliklerde (4.4-4.5) cam yüzeyinden çevreye olan ısı taşınım katsayısı ile ısı kayıp miktarı sırasıyla verilmiştir.

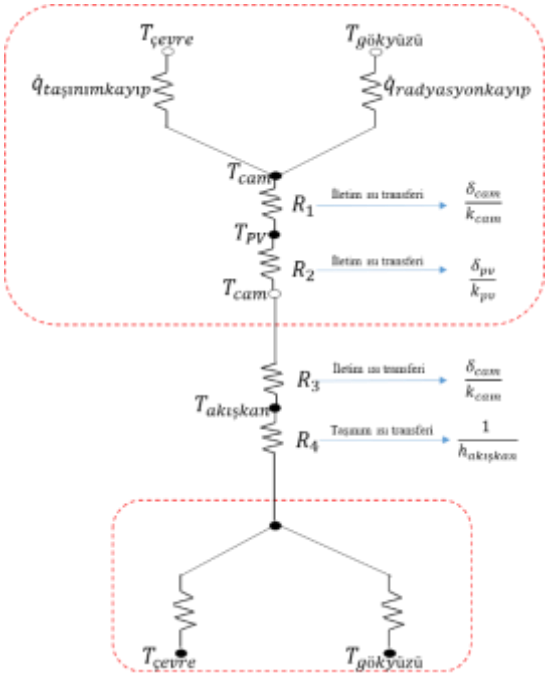
$$h_{taşınım\,cam\rightarrow çevre} = 2.8 + 3V_{rüzgar} \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{taşınımkayıp} = h_{taşınım\,cam\rightarrow çevre} A_{cam}\ (T_{cam} - T_{çevre}) \quad (4.5)$$

Isıl kayıplar hesaplandıktan sonra üst cam yüzeyine gelen net solar radyasyonu aşağıdaki eşitlikle (4.6) hesaplamak mümkündür.

$$\dot{Q}_{net} = \varepsilon_{\mathrm{cam}}\mathrm{A}_{\mathrm{cam}}I_{(t)} - (\ \dot{q}_{radyasyonkayıp} + \ \dot{q}_{taşınımkayıp}) \quad (4.6)$$

Cam yüzeyine gelen net ısı akısı (solar radyasyon) hesaplandıktan sonra akışkana iletilen ısı transferinin hesaplanabilmesi için iletim ile olan ısı transferinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için PVT'nin ısıl direnç modeli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan PV/T panelin ısıl direnç modeli Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. PV/T panelin ısıl direnç modeli

Yukarıdaki direnç modeline göre akışkan tarafından emilen ısı miktarı Eş. 4.7 yardımıyla bulunabilir.

$$\dot{Q}_{akışkan,soğurma}=\frac{T_{cam}-T_{akışkan}}{R_1+R_2+R_3+R_4} \tag{4.7}$$

PV/T panelin giriş havası sıcaklığı, çevre havası sıcaklığı ile aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece PV/T panel verimi üzerinde zorlanmış taşınımın etkileri de incelenmiştir. İletim ve taşınımla olan ısı transfer katsayıların hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Reynold ve Prandtl sayıları ise aşağıdaki eşitlikler (Eş. 4.12-4.13) yardımıyla bulunmuştur.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \tag{4.12}$$

$$Pr = \nu/\alpha \tag{4.13}$$

Akışkan kanalında ısı taşınım katsayısının (Eş. 4.14-4.15) bulunabilmesi için akışkanın tüm termofiziksel özelliklerinin ortalama akışkan sıcaklığına göre belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada da akışkanın ortalama sıcaklığı taban alınarak çözümlemeler gerçekleştirilmiştir.

$$h_{akışkan} = \frac{k_{akışkan}\, Nu}{D_h} \tag{4.14}$$

$$D_h = \frac{W\delta}{2(W+\delta)} \tag{4.15}$$

Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak solar hücrenin verimi veya solar hücrenin sıcaklığa bağlı verimi Eşitlik 4.16 yardımıyla hesaplanmaktadır. PV panele gelen solar radyasyonun ürettiği elektriğin verim olarak ifadesi Eş.4.16'da verilmiştir.

$$\eta_{pv} = \eta_{ref}\left[(1 - \beta\left(\mathrm{T}_{pv} - \mathrm{T}_{ref}\right)\right] \tag{4.16}$$

Tez çalışmasında ölçülen değerler arasında PV panelin ürettiği akım-gerilim değerleri de yer almaktadır. Akım-gerilimin fonksiyonu olarak elektriksel verim ifadesi Eş. 4.17'de verilmiştir.

$$\eta_{el} = \frac{P_{max}}{AxG},\ P_{max} = IxV \tag{4.17}$$

Burada $\eta_{ref} = standart\ koşullardaki\ \left(1000\frac{W}{\mathrm{m2}}, 20°C\right) elektriksel\ verim$i ifade etmektedir ve 0,12 olarak alınmıştır. $\beta_0 = \frac{1}{Tref}$ Olarak verilmiştir. $Tref = \frac{\mathrm{T}_{pv}+\mathrm{T}_{amb}}{2}$ (K), T_{ref} ise referans hücre sıcaklığını ifade etmektedir ve 298 K olarak alınmıştır. PV/T panelin termal ve toplam verimi sırasıyla Eş. 4.18 ve Eş. 4.19'da verilmiştir.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{AxG},\ Q_u = \dot{m}c_p\,(T_{out} - T_{in}) \tag{4.18}$$

$$\eta_{PV/T} = \eta_{th} + \eta_{el} \tag{4.19}$$

4.3. Ekserji Analizi

Enerji analizinin hesaplanması, PV/T panelleri için sadece nicel bir analiz sağlar. Ekserji analizi, nicel ve nitel enerji analizi de sağlar. Ekserji, PV/T panelinden temin edilebilecek ve enerjinin kalitesine tekabül eden en yüksek kullanımın potansiyelidir. PV/T panelinin girdi ekserji sayısı sadece güneş ışığından sağlanan radyasyon konsantrasyonudur.

Literatürde girdi ekserji Ėxin veya ĖxS sayısını hesaplamak için birçok formülasyon tipi vardır. Bu çalışmada Petela tarafından verilen denklem seçilmiştir [139].

Ekserji analizi, enerji karakteristiğini veya kapasitesini içerir. Bu nedenle, en yüksek kullanım için enerji potansiyelini değerlendirmeye izin verir. Sınırlı bir süre içinde kalıcı bir durum için, güneş panelinin (PV) ekserji dengesi Eş. 4.20 yardımıyla ifade edilebilir:

$$Ekserji_{giren} = Ekserji_{çıkan} + Ekserji_{kayıp} \tag{4.20}$$

Ekserji analizi, enerji karakteristiğini veya kapasitesini içerir. Bu nedenle, en yüksek kullanım için enerji potansiyelinin değerlendirilmesine izin verir. Sınırlı bir süre içinde kalıcı bir durum için, güneş panelinin (PV) ekserji dengesi Eş. 4.21 yardımıyla ifade edilebilir: [140].

$$E_{ekserji,giren} - E_{ekserji,çıkan} = E_{kserji,kayıp} \tag{4.21}$$

Güneş panelinin ekserji verimliliği, toplam çıkış enerjisinin toplam giriş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Bu ifade için formül (Eş. 4.22) aşağıda verilmiştir:

$$\eta_{ekserji} = \frac{E_{ekserji,çıkan}}{E_{ekserji,giren}} \tag{4.22}$$

Güneş panelinin (PV) giriş ekserjisindeki güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve güneş sıcaklığına dayanır. Aşağıdaki ifade (eş. 4.23) güneş panelinin ekserjisini belirtir:

$$E_{ekserji,giren} = AxGx \left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right)^4\right] \tag{4.23}$$

Burada $T_{çevre}$ ve $T_{güneş}$ sırasıyla çevre sıcaklığı ve güneş sıcaklığını ifade etmektedir. Güneş sıcaklığı bu çalışmada sabit ve 5770 K olarak alınmıştır. Çıkış ekserjisi, termal ve elektrik ekserjinin toplamı olarak ifade edilir. Aşağıdaki ifade (Eş. 4.24) çıkış ekserjisini ifade etmektedir. Termal ekserji Eş. 4.25 yardımıyla ifade edilir:

$$E_{ekserji,çıkan} = E_{ekserji,termal} + E_{ekserji,electrik} \tag{4.24}$$

$$E_{ekserji,termal} = Qx\left[1 - \frac{T_{çevre}}{T_{pv}}\right] \quad (4.25)$$

Burada $\dot{Q}$ kayıp ısı, $T_{çevre}$ çevre sıcaklığı ve T_{pv} ise solar hücre sıcaklığını ifade etmektedir. Q Aşağıdaki gibi (Eş. 4.26) yardımıyla ifade edilmektedir:

$$\dot{Q} = UxAx(T_c - T_a) \quad (4.26)$$

U toplam ısı transfer katsayısını, A ise güneş panelinin alanını ifade etmektedir. Elektriksel ekserji, güneş panelinin (PV) çıkış enerjisine (Eşitlik 4.27) yani çıkan elektriksel güce (Watt) eşittir. Aşağıdaki gibi (Eş. 4.27) yardımıyla ifade etmek mümkündür. Bu durumda ekserji verimi Eş. 4.28'deki gibi olacaktır:

$$E_{ekserji,elektrik} = IxV = P_{max} \quad (4.27)$$

$$\eta_{el} = \frac{E_{ekserji,çıkan}}{E_{ekserji,giren}} = \frac{E_{ekserji,termal} + E_{ekserji,eleketrik}}{E_{ekserji,giren}} = \frac{UxAx(T_{pv} - T_{çevre}) + IxV}{AxGx\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{çevre}}\right)^4\right]} \quad (4.28)$$

Toplam ısı transfer katsayısı taşınım ve radyasyonla olan ısı transfer katsayılarının toplamına eşittir, aşağıdaki gibi (4.29-4.34) ifade etmek mümkündür:

$$U = h_{rad_{cam \rightarrow gökyüzü}} + h_{taşınım_{cam \rightarrow çevre}} \quad (4.29)$$

$$\sum E_{ekserji,giren} - \sum E_{ekserji,çıkan} = \sum E_{ekserji,yıkımı} \quad (4.30)$$

$$\sum E_{ekserji,giren} - \sum (E_{ekserji,termal} + E_{ekserji,eleketrik}) = \sum E_{ekserji,yıkımı} \quad (4.31)$$

$$E_{ekserji,termal} = Q_u\left(1 - \frac{T_{çevre}}{T_o}\right) \quad (4.32)$$

$$E_{ekserji,eleketrik} = \eta_{el} xAxGx\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{çevre}}{T_{güneş}}\right)^4\right] \quad (4.33)$$

PV/T panelin genel ekserjisi ise şu şekilde ifade edilir.

$$E_{ekserji,PV/T} = E_{ekserji,termal} + E_{ekserji,elektrik} \quad (4.34)$$

Burada $E_{ekserji,termal}$ PV/T panelin termal ekserjisini, $E_{ekserji,elektrik}$ ise güneş panelinin ekserjisini ifade etmektedir. Sonuç olarak ekserji verimi aşağıdaki (4.35) gibi yazılır.

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{E_{ekserji,yıkımı}}{E_{ekserji,giren}} \tag{4.35}$$

4.4. Belirsizlik Analizi

Deneylerde veriler ölçme tekniğine uygun ölçüm cihazları ile ölçülmüştür. Standartlara uygun cihazlara, uygun ortam koşullarına sahip olunsa da verilerde çeşitli hatalar oluşabilir. Cihaz seçimi, deney şartları, kullanılan cihazların kalibrasyonu, verilerin okunması, ölçüm aletlerinin bağlantı noktaları ve deneyin yapıldığı ortam gibi deney sonuçlarını etkileyen (hata ve belirsizliklere yol açan) birçok parametre vardır. Bu nedenle deneysel çalışmada kullanılan cihaz ve ekipmanlardan kaynaklanan bu gibi hatalar, belirsizlik analizi ile çözümlenmiştir. Bu yüzden belirsizlik analizi istenen deneysel standartların sağlanması açısından önemlidir.

Deneysel çalışmaların tasarımında ve planlanmasında belirsizlik analizi güçlü bir yöntemdir. Yapılan deneylerde ölçümlerde doğruluğu etkileyen en önemli etken deneyler sırasında oluşabilecek hatalardır. Toplam belirsizlik aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [141, 142]. Toplam belirsizlik aşağıdaki eşitlik (Eşitlik 4.36) ile hesaplanmıştır.

$$W_R = \left[\left(\frac{\delta R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\delta R}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \tag{4.36}$$

Formülde kullanılan ifadeler, R ölçülmesi gereken büyüklük, R büyüklüğüne etki eden n adet bağımsız değişkenler ise x_1, x_2, x_3, ...x_n'dir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları w_1, w_2, w_3,...w_n ve S büyüklüğünün toplam belirsizliği W_R olarak ifade edilmiştir.

Belirsizlik analizleri ile ölçüm cihazlarının belirsizlikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan belirsizliklerinin kabul edilebilir aralıklarda olduğu görülmektedir.

Ölçüm cihazlarına ait teknik özellikler ve cihazların toplam belirsizlikleri Çizelge 4.2'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney setinde kullanılan ekipmanların özellikleri

Ekipman	Model	Özellikleri	Hata oranı	Adet)
Anemometre	Kimo, VT 200	0-20 m/s, 0.3-35 m/s, -20-+80°C	±0,03 m/s, ±0,1°C	2
Solarimeter	Kimo, SL 100	0-1300 W/m^2	±5%	1
Sıcaklık ve Bağıl Nem	Testo, 625	5-95% bağıl nem, 0-70°C sıcaklık aralığında	±2%, ±0,5°C	1
Data Logger (Thermokupl)	Elimko, E-680	K type, ölçüm aralığı -200-1200°C	±0.5 °C	10
Güç Analizörü	Fluke 43B Power Quality Analyzer	RS232 kablo ile elde edilen verileri bilgisayara aktarma 1A–500A	±2%+6	2
Invertör	Ataba 600W AT-2460	220/230 Vac, 20-30 V Verim %85 Çalışma sıcaklığı -35-70°C		1
Akü	Yigit Battery YD12-26 12V26AH	Çalışma sıcaklığı -15-40°C		2

4.5. Kurutma Eğrilerinin Analizi

Kurutma eğrileri, belirli koşullar altında kurutma işlemi için en uygun modeli bulmak için kurutma oranları için işlenebilir. Literatürde deneysel olarak elde edilen nem oranı (MR) Eşitlik 4.37 ile ifade edilmiştir. Deney sırasında nane yaprakları ve elma dilimlerinin nem oranı ve kurutma oranları (DR) aşağıdaki formüller Eşitlik 4.37 ve Eşitlik 4.38 kullanılarak hesaplanmıştır. Kuru baza göre X_e denge durumundaki nem içeriği, X_0 t = 0 anındaki nem içeriğini (kuru baza göre), X_t t anındaki nem içeriğini (kuru baza göre) ifade etmektedir. Ancak, taze meyvelerin yüksek nem içeriğinden dolayı [143] ve X_e değerleri uzun süreler için X and X_0 değerleri ile karşılaştırıldığında nispeten küçüktür. Bu yüzden denklem MR= X_t /X_0 şeklinde basitleştirilebilir [144].

$$MR = \left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right) \tag{4.37}$$

$$DR = \frac{X_{t+dt} + X_t}{(dt)} \tag{4.38}$$

4.6. Enviroekonomik (Çevresel Maliyet) Analiz

Çevresel maliyet analizi veya Enviroekonomik (çevresel maliyet) analiz, sistemin atmosfere saldığı karbon miktarının fiyatı (veya CO_2 emisyon fiyatı) hesaplanarak yapılır. Karbon maliyeti, küresel ısınmaya neden olan sera gazlarının emisyonunun maliyetini hesaplamak

için iyi bir yaklaşımdır. Bu yüzden ulusal sera gazı emisyonunun önlenmesinde bir karbon fiyatının belirlenmesi kullanılabilecek başlıca yöntemler arasındadır. Belirlenen karbon maliyeti yani atmosfere salınan karbon (CO_2) bedelinin ödenmesi sayesinde, ülkeler ve insanlar salınacak olan karbonu azaltmaya yöneleceklerdir. Bu durum aynı zamanda atmosfere karbon yaymayan yenilenebilir enerji teknolojilerinin önemini de ortaya koyacaktır [145].

Sovacool 2008 yılında yayınladığı makalesinde kömürden elektrik üretimi için ortalama CO_2 eşdeğer yoğunluğunu yaklaşık olarak 960 g CO_2/kWh olarak vermiştir [146]. Bu değer %40'lık iletim ve dağıtım kayıpları ve %20'lik kullanılan verimsiz elektrik aletlerinden kaynaklı kayıplarla beraber aslında 2.08 kg CO_2/kWh olarak düzeltilecektir [147]. Bu nedenle, PV/T panelde CO_2 azaltımı Eş. 4.39'daki gibi verilir:

$$\Phi_{CO_2} = \Psi_{CO_2}\ x\ \dot{Q}_u \tag{4.39}$$

Burada Φ_{CO_2} saatte azaltımı sağlanan CO_2 miktarını (kgCO_2/h), Ψ_{CO_2} kömürden enerji üretimi esnasında açığa çıkan ortalama CO_2 emisyonu miktarını (2,08 kgCO_2/kWh) göstermektedir. Elzen ve ark. [148] 2011 yılında CO_2 fiyatının 13 \$/t CO_2 ile 16 \$/t CO_2 arasında olduğunu bildirmiştir. Hesaplamalarda bu değerlerin ortalaması olan 1,45 ¢/kgCO_2 değeri kullanılmıştır.

$$Z_{CO_2} = P_{CO_2}\ x\ \Phi_{CO_2} \tag{4.40}$$

Burada Z_{CO_2} çevresel maliyet (saatlik CO_2 azaltım fiyatı, ¢/h) P_{CO_2} kgCO_2 başına düşen karbon fiyatıdır ve 1,45 ¢/kg CO_2 olarak alınmıştır.

4.6.1. Sürdürülebilirlik endeksi ve geliştirme potansiyeli

PV/T panellerin verimliliği genellikle ortam koşullarının, çalışma akışkanının debisinin veya hızının, akışkanın panele giriş-çıkış sıcaklığının, PV yüzey sıcaklığının ve güneş radyasyonunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Sürdürülebilir endeks ekserji performansını ifade etmek için kullanılan bir diğer parametredir. Aşağıdaki eşitlik (Eş. 4.41) yardımıyla bulunabilir [149].

$$SI = \frac{1}{1-\eta_{ex}} \tag{4.41}$$

Ekserjik bir kavram olan IP kavramı, sistemlerin veya süreçlerin verimli analizinde çok yararlı olabilir [144, 150, 151]. Vangool [152] iyileştirme potansiyeli kullanımının ekonominin farklı süreçlerinin değerlendirilmesinde yararlı olabileceğini öne sürmüştür. Ekserji verimliliği, ekserji kaybı kullanılarak sürecin potansiyeli olarak açıklanmıştır [152] ve Eş. 4.42 yardımıyla hesaplanabilir:

$$IP = (1 - \eta_{ex})E_{xloss} \tag{4.42}$$

4.7. Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sayısal analiz, momentuma, kütlenin korunmasına ve enerjiye ilişkin denklemler yardımıyla matematiksel olarak açıklanır. Kısmi diferansiyel denklemler (KDD'ler) akışkanı sürekli bir ortam olarak tanımlar. Bu teknikler, fiziksel alan birkaç ayrı kontrol hacmine bölündüğünde KDD'leri cebirsel denklemlerle değiştirerek sorunu çözmek için kullanılır. Kontrol hacimlerinin her biri hücreler veya element olarak adlandırılırlar. Bu hücreler, sıcaklık, hız ve basınç gibi akış değişkenlerinin yerel ayarlarda, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin arkasındaki ana fikir olan uzay koordinatlarıyla nasıl değiştiğine dair cebirsel ilişkiler gösterir. Öte yandan, HAD, matematiksel modellemenin yanı sıra çözücüler, çözümleme yöntemleri, ağ yapısı oluşturma ve sayısal parametreler yardımıyla akışkan mühendisliği sistemlerini simüle eder [153].

Bir HAD yaklaşımını takip etmek, akışkan dinamik sorununu çözmek için birçok değerli yarar sağlar, bunlardan şöyle bahsetmek mümkündür:

Hesaplamalı Akışkan dinamiği (HAD) daha ucuz ve daha hızlı çalışması bakımından dikkate değer bir şekilde maliyet azaltıcı, zamandan tasarruf ve problemleri geleneksel yaklaşımlarla göre daha uygun bir şekilde çözmemize yardımcı olur. Tasarım sürecinin ilk aşamalarında istenen görevlere uygun şekilde uyum sağlamak için simülasyon değerlendirmeleri ile mümkündür.

HAD analizi deneysel testlerden önce yapıldığından tasarım sürecinde farklı deneyler yapılmasına imkân tanır.

• Tam bir nümerik çözümün (spektrum analizi vb.) tamamının, elbette aşırı termo akış koşullarına ve karmaşık geometrilere sahip olan fotovoltaik termal güneş panelleri gibi sistemlerde yapılması zordur. HAD çalışmaları bu gibi durumlar için uygundur.

• Kalitenin temel ve önemli bir bileşeni olarak, HAD kalitesinin ölçümü, karmaşık sistemler ve zamana bağlı akışlar için en son teknikleri ve teknolojileri kullanarak ayrıntılı bir çözüm bulması ile ölçülebilir.

• Nümerik modellerin uygulanması, fiziksel problemleri yüksek doğrulukta ve daha fazla güvenilirlikle çözer ve çözüm şemalarında ve türbülans modellerinde matematiksel iyileştirmeler yapmaya yardımcı olur.

• En son gelişmelerden sonra, bir akışkan dinamiği problemini çözmek ve çözümünü tahmin etmek çok güçlü bilgisayarlar gerektirmediğinden artık zor bir şey değildir. Bu amaç için sadece kişisel bir bilgisayar yeterlidir.

4.7.1. Temel denklemler

Navier-Stokes Denklemleri akışkanların fiziksel özelliklerinin korunumu yasasına dayanan HAD denklemleridir. Bu prensip, sıvının özelliklerinin nasıl değiştiğini açıklar. Bu özellikler giren ve çıkan enerji, kütle ve momentuma bağlıdır. Kütlenin (Eş. 4.43), Momentumun (Eş. 4.44 ve Eş 4.45) ve Enerjinin (Eş. 4.46) korunumu yasası uygulandığında, enerji denklemi ve momentum denklemine ek olarak bir süreklilik denklemi elde edilebilir:

Bir akışkan parçacığı akışı için geliştirilen eşitlikler, fiziğin korunum kanunlarının matematiksel olarak ifade edilmesini temsil etmektedir. Kütlenin korunumunun en genel ifade şekli (Eş. 4.43) şöyledir [154]. Momentumun ve enerjinin korunum denklemi sırasıyla Eş. 4.44-4.45 ve Eş. 4.46 ile ifade edilmektedir.

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \qquad (4.43)$$

Eşitlik 4.43 zamana bağlı sıkıştırılabilir bir akıştaki bir noktada, üç boyutlu olarak kütlenin korunumu ya da süreklilik denklemini temsil eder. Bu eşitlikteki ilk ifade $\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)$, yoğunluğun zamana bağlı olarak değişimini ifade eder. Bu çalışmada yapılan modellemeler zamandan bağımsız olarak çözüldüğü için bu ifade sıfır olmaktadır. İkinci ifade ise $\left(\nabla(\rho v)\right)$, akışkan elemanının sınırları boyunca meydana gelen net kütle akışıdır ve konvektif terim olarak da bilinir [154].

Momentum Denklemi

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\nabla(\nabla \mathrm{u}) + \rho g_x \tag{4.44}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\nabla(\nabla v) + \rho g_y \tag{4.45}$$

Enerjinin Korunumu Denklemi

$$\rho c_p \left(\frac{dT}{dt} + \nabla \mathrm{TV}\right) = \nabla(\nabla \mathrm{kT}) \tag{4.46}$$

Fotovoltaik-Termal güneş panellerindeki sayısal analiz çözümlemeleri için ısı transferi ve hava akış modelinde, süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümünde, aşağıdaki varsayımlar uygulanmıştır [153].

1. Basınçsız türbülanslı akış ve kanal boyunca tek faz.

2. Sürekli üç boyutlu (3D) boyutlu akışkan akışı ve ısı transferi.

3. Sürekli durum koşulu (tamamen gelişmiş akış)

4. Hem katı emici plaka (bakır) hem de akışkan (hava) için termo-fiziksel özellikleri sabittir.

5. Yerçekimi ihmal edilmiştir.

4.7.2. Standart k-epsilon modeli

Bu çalışmada türbülans modelinin çözümünde standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Standart k-ε türbülans modeli en yaygın kullanılan modeldir. k-ε denklemlerinde bilinmeyen ve ölçülemeyen birçok terim vardır. Çok daha pratik bir yaklaşım için, ilgili süreçleri en iyi şekilde anlamamıza, böylece bilinmeyenleri en aza indirgemesi açısından çok sayıda türbülanslı uygulamaya uygulanabilmektedir. Standart k-ε yaygın ve yaygın olarak kullanılan iki denklemli bir modeldir. Bu modelde çözülen iki taşıma değişkeni k, türbülanslı kinetik enerji ve ε, türbülanslı yayılımdır. Bu model, karmaşık akışlarda türbülanslı uzunluk ölçekleri önermek için uygulanmıştır.

Türbülanslı viskozitesinin (μ_t), türbülans hızı ve uzunluk skalası ile orantılı olduğu varsayılır. Bu skalalar türbülans kinetik enerjisinden (k) ve yayılma oranından (ε) elde edilir. Türbülans vizkosite ifadesi aşağıdaki (Eş. 4.48) gibidir [73].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4.48}$$

$C\mu$, deneysel bir sabittir. k-ε türbülans modelinde türbülans vizkozitesinin (μt) hesaplanması için k ve ε değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerler ise aşağıda verilen denklemlerden elde edilmektedir [155, 156]. k ve ε transport nakil değişkenlerini çözmek için kullanılan transport denklemleri aşağıdaki gibidir (Eş. 4.49-4.51): Türbülans kinetik enerji k,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\partial k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + 2\mu_t E_{ij}E_{ij} - \rho\varepsilon \tag{4.49}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j k\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P - \rho\varepsilon + P_{kb} \tag{4.50}$$

Türbülans dissipasyon oranı ε,

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\partial\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\mu_t E_{ij}E_{ij} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4.51}$$

Ortalama hız gradyentinden ve viskoz kuvvetlerden dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimi, $C_{\varepsilon 1}$ ve $C_{\varepsilon 2}$ deneysel sabitleri, σ_k ve σ_ε Prandtl sayılarını göstermektedir. Denklemim çözümü için gerekli sabitlerin değerleri ise Çizelge 4.3'da verilmiştir [155, 156]:

Çizelge 4.3. k-ε modelde kullanılan sabitler [7].

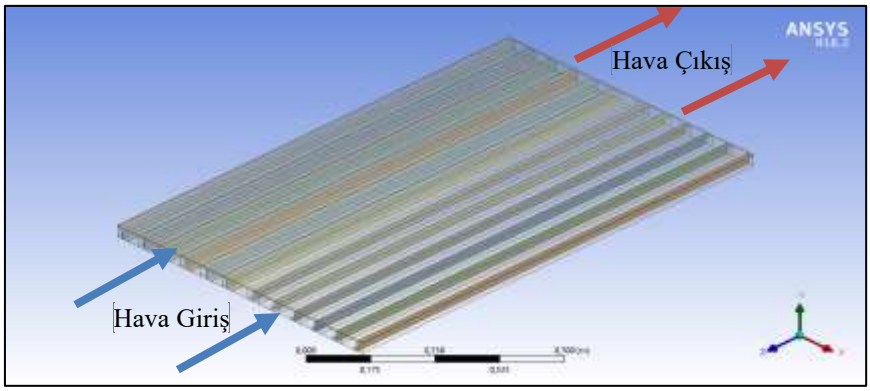
$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_{μ}	σ_{ε}	σ_{k}
1.44	1.92	0.09	1.3	1.0

Birçok yaklaşımda olduğu gibi bu modelde de ihmaller varsayımlar söz konusudur Sonuç olarak modellenmiş ε transport modeli k transport denklemine çok benzer bir formda ve olarak kullanılabilmektedirler.

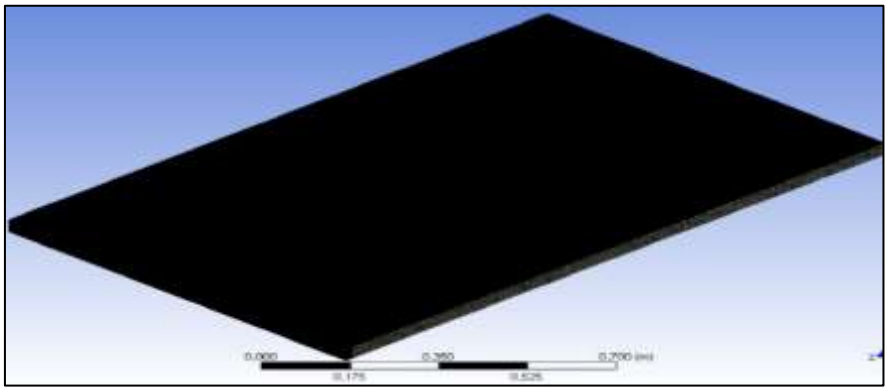
4.7.3. Modelin Oluşturulması, ağ yapısı ve sınır şartları

ANSYS 18.2, PV/T panelin farklı odak noktalarında ısıl simülasyon ve sıcaklık gelişiminin tahmini için Fluent yazılımı kullanılmıştır. ANSYS'in bir alt programı olan ‘‘Design Modeler’’ 3-D akış alanını çizmek için kullanılmıştır [139, 157]. ‘‘Mesh’’ yapısı akışın modellenmesinde büyük öneme sahiptir. İlk önce akışı göstermek için kaba bir mesh yapısı kullanıldı. Momentum, süreklilik ve enerji denklemlerinin çözümü için sonlu hacimler yöntemi olan ‘‘second order upwind scheme’’ kullanıldı. Temel denklemlerin ayrıklaştırılması için ‘‘SIMPLE’’ algoritması seçildi. Güneş panelinin yüzeyine ortalama bir ısı akısı koşulu uygulanırken PV/T'nin diğer tüm yüzeylerine adyabatik sınır koşulu uygulanmıştır. Diğer tüm yüzeyler tamamen sıfır ısı akısı ile izole edilmiş olarak kabul edilmiştir. Tüm yüzeylere ‘‘no slip condition’’ koşulu uygulanmıştır. Giriş hava hızı homojen kabul edilmiştir ve çıkışta basınç koşulu uygulanmıştır. Süreklilik denkleminin ‘‘residual’’ları için 10E-6, hız bileşenlerinin ‘‘residual’’ ‘ları için 10E-6 ve enerji ‘‘residual’’ ‘ları için için 10E-8 yakınsama sınırı alınmıştır. İlk sonuçları aldıktan sonra, daha iyi sonuçlar elde etmek için mesh yapısı belirli yerlerde daha ince hale getirilmiştir.

Türbülans modeli olarak Standart k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Geometri ve mesh yapısı Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri 10E-6 yakınsama kriterleri ile çözülmüştür. Basınç, hız ve sıcaklık terimlerinin ayrıklaştırılması için yüksek çözünürlüklü bir tavsiye şeması seçilmiştir. Küresel dinamik model kontrolleri süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü için uyarlanmıştır



Şekil 4.2. PV/T sistemin geometrisi



Şekil 4.3. PV/T sistemin mesh yapısı

4.8. Sistemin Tasarımı ve Üretimi

Yukarıda yapılan CFD analizi sonucunda sistem için gerekli tüm ekipmanlar numerik analize uygun olarak imal edilmiştir. Tez çalışması kapsamında literatür çalışmaları ışığında güneş enerjili fotovoltaik-termal panelin teorik analizi, tasarımı ve tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca tasarlanan PV/T Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında üretilmiştir (Resim. 4.1).

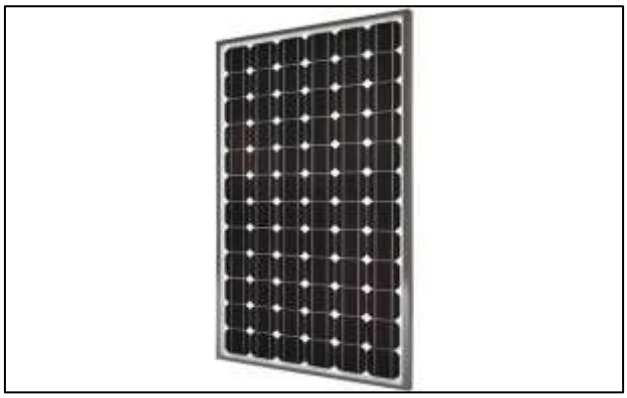


Resim 4.1. Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Laboratuvarında Üretilen PV/T

Yapılan incelemeler sonucunda seçilen güneş paneli olarak mono kristal yapıdaki 60 adet solar hücreden oluşan güneş paneli seçilmiştir. Güneş panelinin özellikleri ve teorik değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Güneş paneline ait resim de Resim 4.2'de verilmiştir. PV/T panel için hazırlanan güneş paneli iki adet cam arasına yerleştirilmiştir (Resim 4.3).

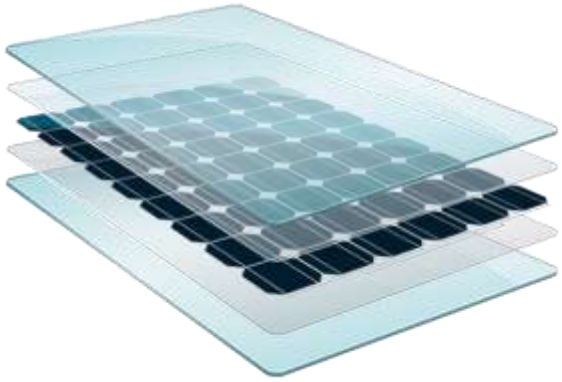
Çizelge 4.4. PV/T panelin özellikleri

Özellikleri	
Güç	300 W
Hücre Sayısı	60
Açık Devre Voltajı (Voc)	37,60
Maks. Voltaj (Vmp)	31,30
Kısa Devre Akımı (Isc)	9,93 A
Maks. Akım (Imp)	9,58 A
Maks. Sistem Voltajı	1000 V
Mekanik Özellikler	
Ölçüleri (mm)	1640*990*35
Ağırlık	19 kg
Standart Test Koşulları: Am=1,5 E=1000W/m^2 Tc=25℃	



Resim 4.2. Mono kristal güneş paneli

Monokrtistal güneş paneli iki adet damperli cam arasına yerleştirilmiştir. Fotovoltaik termal panelin içerisindeki havaya sera etkisi yapması için cam-cam tipteki panel seçilmiştir. Böylece termal verimden yüksek oranda iyileştirme sağlanması amaçlanmıştır.



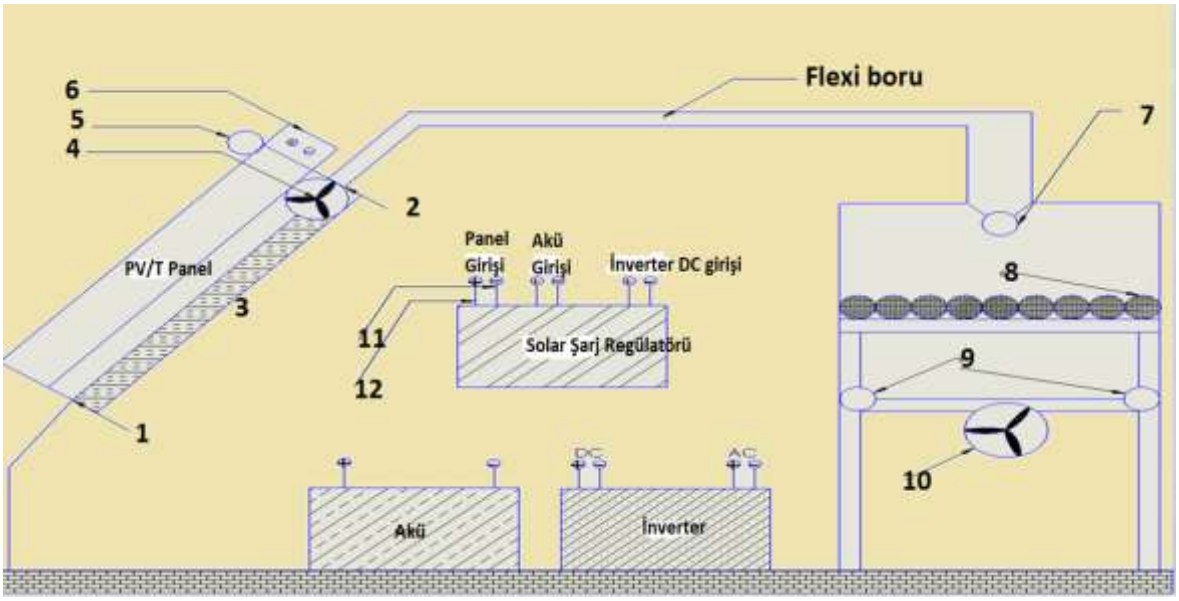
Resim 4.3. PV/T panelin bileşenleri

Çalışmada deneyler yapılmadan önce sistemin termal ve elektriksel verimleri, sistemdeki ısı kayıplarının hesaplanması için analitik çözümü yapılmıştır. Bunun için literatürden ısı transferi hesaplama yöntemi esas alınarak teorik olarak hesaplamalar yapılmıştır. Teorik analizin hesaplanmasında tüm materyaller için enerji dengesi eşitlikleri yazılmıştır. Enerji dengesi eşitliklerine PV/T'nin verimi hesaplanmıştır.

4.9. Deney Sisteminin Hazırlanması

Güneş enerjili fotovoltaik termal panele entegreli infrared enerjili konvektif kurutucunun deneyleri sonbahar ve kış aylarında gerçekleştirilmiştir. Sonbaharda yapılan deneylerde ürün kurutulması gerçekleştirilmemiş, sadece panelin termodinamik analizi hesaplanmıştır. Böylece, literatürde daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmasının yapılması amaçlanmıştır. Kış aylarında yapılan deneylerde ise panelin termodimak analizinin yanı sıra kurutma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. PV/T panelin giriş havası sıcaklığı, çevre hava sıcaklığı ile aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Çevre havasının PV/T panele girişini sağlamak amacıyla panelin altında 20x100 mm'lik kanal açılmıştır ve panelin hava çıkışına iki adet 20W'lık (20x2 W) fan yerleştirilmiştir. Böylece, PV/T panele giren havanın fanlar yardımıyla yukarı taşınması sağlanmıştır. Deney setinin daha iyi anlaşılması için şematik çizimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Kurutulma deneylerinde PV/T panelin performansının ölçülmesinin yanı sıra, üretilen sıcak havanın ürün kurutulmasında kullanımı sağlanmıştır. PV/T'de üretilen sıcak hava 100mm çapındaki diğer ucu kurutma kabinine bağlanmış olan borudan (flexi) geçerek, kurutma kabinine girişi sağlanmıştır. Kurutma kabinindeki sıcak ve nemli havanın tahliyesi için de kurutma kabininin al tarafına 40W'lık bir fan yerleştirilmiştir. Kurutma süresini kısaltmak amacıyla kurutma kabininin üst tarafına 100W'lık infrared bir

lamba yerleştirilmiştir. Halojen lamba, ürün yüzeyi 35°C'ye ulaştığında durmasını sağlamak amacıyla termostat ile kontrol edilmiştir. Böylece enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır.



1. PV/T panelin hava girişi, 2. Panelin hava çıkışı, 3. PV/T arka panel, 4. Panel çıkışındaki fan, 5. Solarimetre, 6. PV arka panel elektrik bağlantısı, 7. İnfrared lamba, 8. Kurutulan ürün, 9. Load cell, 10. Kurutma kabinindeki Fan, 11-12 PV panelin solar şarj regülatörüne bağlantısı

Şekil 4.4. Deney setinin şematik gösterimi



Resim 4.4. Yeni nesil güneş enerjili fotovoltaik-termal bir kurutucunun fotoğrafı

4.10. Deneysel Çalışma

Yapılan çalışmada deneyler iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki PV/T panelin performansının değerlendirilmesi, diğeri ise PV/T panelden elde edilen sıcak havanın kurutma kabinine gönderilip ürün kurutmada kullanılması amaçlanmıştır. PV/T panelin performans değerlendirilmesi yapılırken ısıl ve elektriksel verimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deneylerdeki sıcaklıklar PV/T içerisine yerleştirilmiş termokupllar yardımıyla ölçülmüştür. Termokupl değerleri deney setinde kullanılan Data Logger ‘dan alınmıştır. Her 10 dakikada bir ölçümler okunarak yazılmıştır. Çevre havasının sıcaklığı gölgede ölçülmüş değerlerdir. Çevre havasının sıcaklığının yanında çevre havasının bağıl nemi de ölçülmüştür. Akım-gerilim değerleri için ‘’Fluke’’ marka akım ve gerilimölçer kullanılmıştır. Depo edilen enerjinin miktarı akülerden alınmıştır. PV yüzey sıcaklığının değeri ‘’Kiray 100’’ marka infrared okuyucu ile PV yüzeyinden 10cm uzakta olacak şekilde okunmuştur.

Çizelge 4.4’de yapılan deneylerin bir planı oluşturulmuştur. Buna göre PV/T performans deneyleri için gerekli parametreler tüm deneylerden elde edilirken, kurutma deneyleri için de farklı iki gün ve farklı iki malzeme kurutulmuştur.

Çizelge 4.5. Deney Planı

Yapılış tarihi	Panel açısı (°)	Hava hızı (m/s)	Debi (kg/s)	Kurutma	Kurutulan ürün	PV/T Performansının Değerlendirilmesi
11/09/2019	24,8°	2,5	$\dot{m} = 0{,}03109$			✓
12/09/2019	24,8°	2	$\dot{m} = 0{,}02552$			✓
03/11/2019	39,8°	3,5	$\dot{m} = 0{,}045530$	✓	nane	✓
04/11/2019	39,8°	3	$\dot{m} = 0{,}036424$	✓	elma	✓

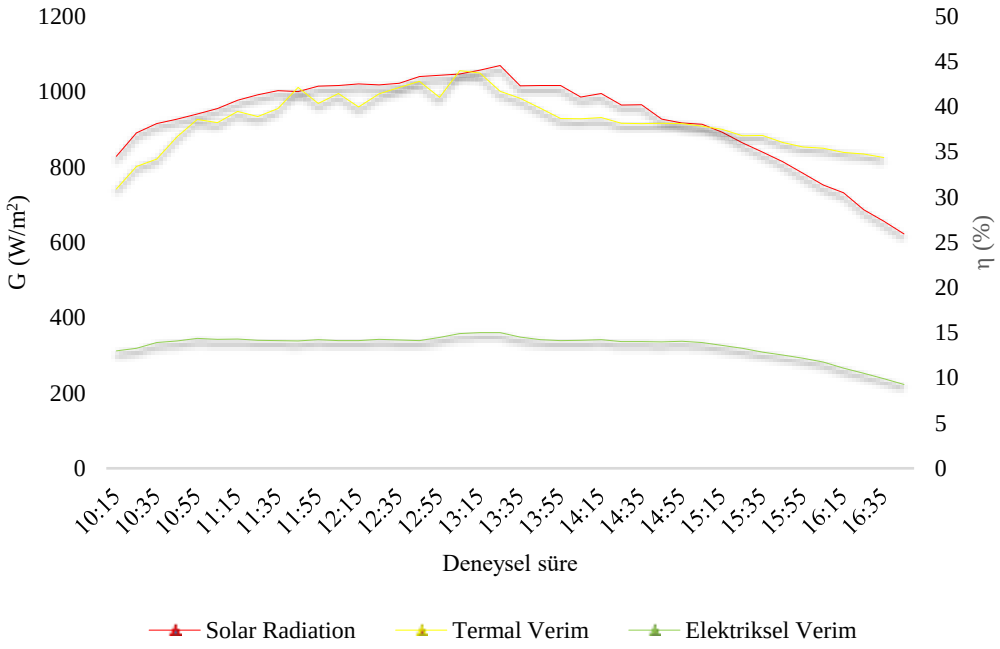
Deneysel çalışmalarda, güneş enerjisi uygulamalarında mevsimsel çalışmalarda enlem açısı olarak aşağıdaki hususlar dikkate alınarak yapılmıştır. PV/T performansının test edilmesi için yapılan deneylerde herhangi bir ürün kurutulmamıştır. Bu deneylerde panele, giren çevre havasının sıcaklığı, hızı, bağıl nemi, PV yüzey sıcaklığı, akım-gerilim parametreleri, gibi değerler ölçülmüştür.

5. BULGULAR VE SONUÇLAR

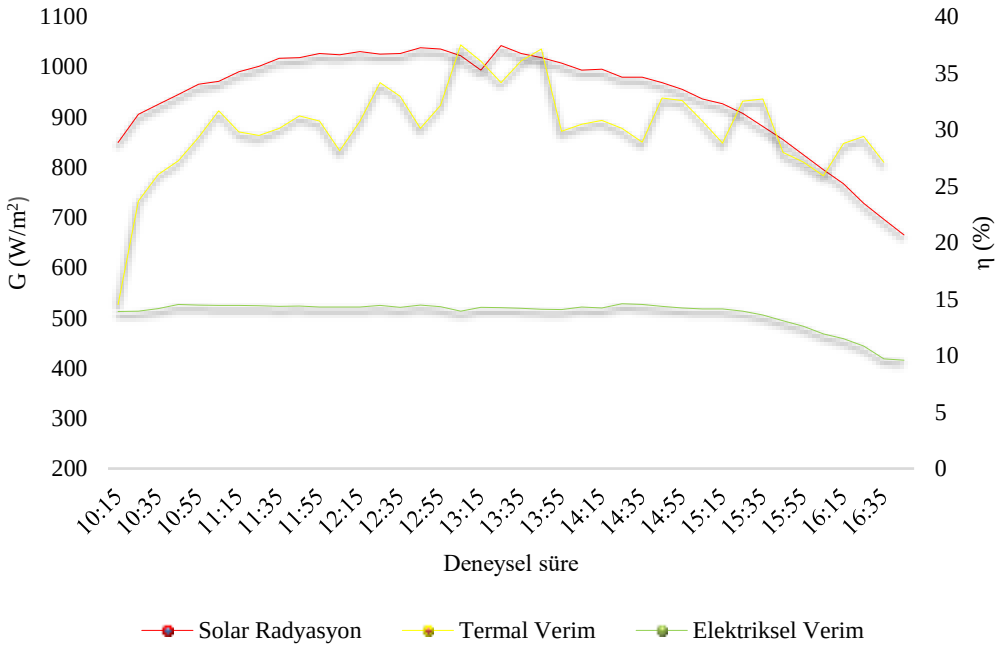
5.1. Enerji ve Ekserji Analizi Sonuçları

Sonbahar ve kış aylarında yapılan deneylerde PV/T performansının değerlendirilebilmesi için, panel çıkışına yerleştirilen fanların hızları ayarlanarak içeri giren havanın hızı ölçülmüştür. Giriş havasının hızları 2,5-3,5 m/s arasında değişim göstermiştir. Seçilen bu hava hızları, HAD analizindeki optimum değerlere bağlı kalınarak deneysel çalışmada da kullanılmıştır.

Şekil 5.1 anlık radyasyonun, termal ve elektriksel verimin zamanla nasıl değiştiğini gösterir. Buna göre, termal verimliliğin artan radyasyonla arttığı ve elektriksel verimliliğin artan PV sıcaklığıyla azaldığı tespit edilmiştir. Sonbaharda yapılan ilk deneyde, hava debisi $\dot{m} = 0{,}031087\ kg/s$ 'dir. Solar radyasyonun gün içerisindeki en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 1069 W/m^2, 622 W/m^2 ve 928 W/m^2 'dir. Gün ortasında, radyasyonun maksimum olduğu anda (1069 W/m^2) termal veriminin en yüksek değerini aldığı gözlenmiştir. Termal verimin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %43,98; %18,87 ve %37,10 olduğu, elektriksel veriminin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %15,01; %9,27 ve %13,56 olarak tespit edilmiştir. Solar radyasyonun artmasıyla elektriksel verimde küçük miktarlarda düşüşün meydana geldiği gözlenmiştir. Sonbaharda yapılan ikinci deneye ait grafik Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Termal verim ve elektriksel verimin solar radyasyonla değişiminin gösterildiği grafikte, ışınımın artmasıyla termal verimliliğin arttığı ve PV yüzey sıcaklığının artmasıyla elektriksel verimliliğin azaldığı tespit edilmiştir. Hava debisinin $\dot{m} = 0{,}02552\ \mathrm{kg/s}$ olduğu deneyde solar radyasyonun gün içerisindeki en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 1042 W/m^2, 665 W/m^2 ve 944 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Termal verimin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %37,48; %11,90 ve %29,78 olduğu, elektriksel veriminin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %14,48; %9,59 ve %13,73 olarak tespit edilmiştir.



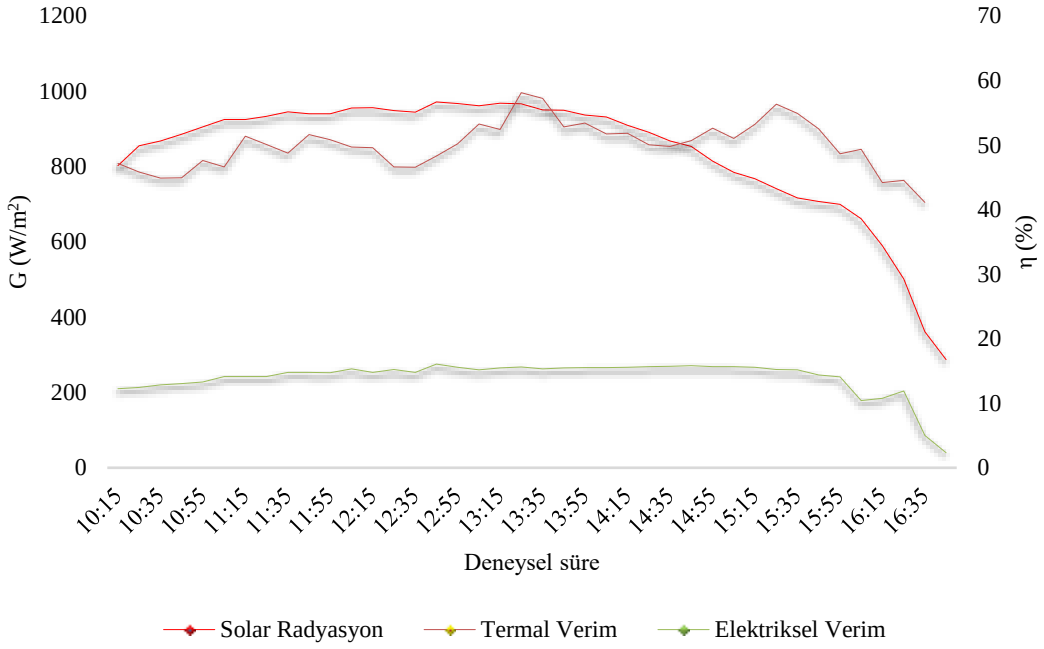
Şekil 5.1. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 11/09/2019



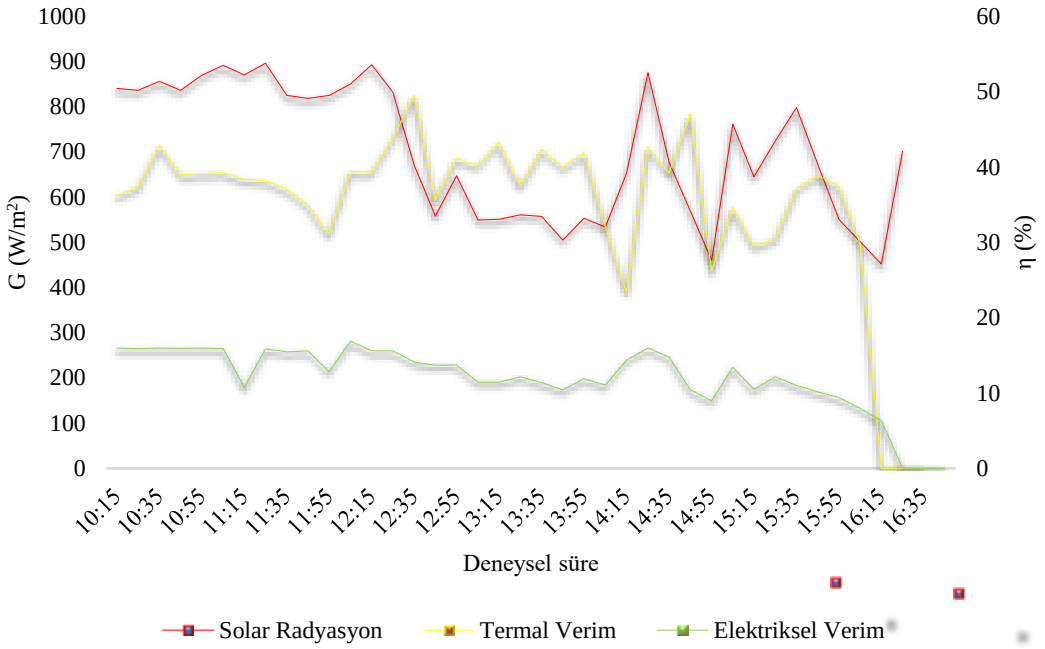
Şekil 5.2. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 12/09/2019

Kış aylarında yapılan deneylerde PV/T performansının değerlendirilebilmesine ek olarak, panele entegre edilen infrared enerjili kurutma odasında farklı iki tarım ürünü olan nane ve elma kurutulmuştur. PV/T panel, çevre havasını içeri girecek şekilde tasarlandığından ve kış aylarında dış hava sıcaklığı sonbahara göre daha soğuk olduğu için performans değerlendirilmesi daha gerçekçi olarak yapılmıştır. Çünkü çıkış havası sıcaklığı duyusal

olarak daha iyi hissedilmiştir. Kış aylarında yapılan ilk deneyde termal ve elektriksel verim değerlerinin değişimi Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Debinin $\dot{m} = 0{,}04553\ kg/s$ olduğu deneyde ışınım değerleri en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 971 W/m^2, 287 W/m^2 ve 836 W/m^2 'dir. Işınım arttıkça termal verimin arttığı ve en yüksek, en düşük ve ortalama termal verimin sırasıyla %58,07; %40,72 ve %49,94 olduğu, elektriksel veriminin ise sırasıyla %15,79; %2,33 ve %13,98 olarak tespit edilmiştir. Kış aylarında yapılan ikinci deneye ait veriler Şekil 5.4'te verilmiştir. $\dot{m} = 0{,}036424\ kg/s$ debi ile yapılan bu deneyde güneş radyasyonunun en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 896 W/m^2, 452 W/m^2 ve 702 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Termal ve elektriksel verimlerin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %49,54; %23,35 ve %37,50; %15,99; %6,34 ve %12,99 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.3. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 03/11/2019



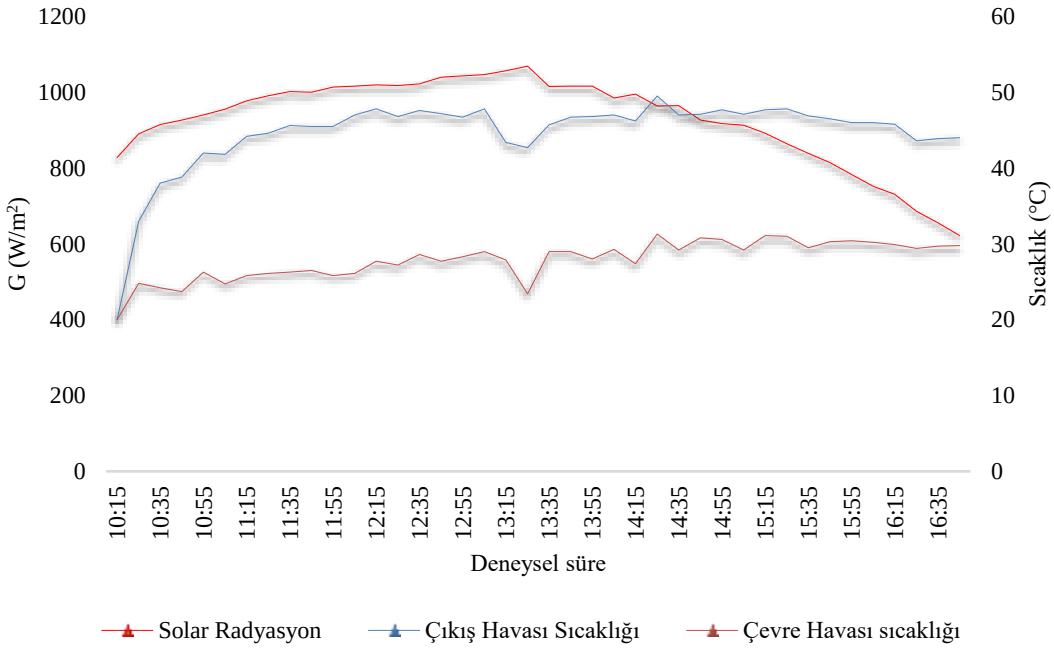
Şekil 5.4. Termal ve elektriksel verimin zamanla değişimi 04/11/2019

Sonbahar şartlarında yapılan deneylerde ortalama ışınımın 936 W/m^2 olduğu ve buna bağlı olarak da termal ve elektriksel verimlerin ortalama değerleri sırasıyla %33,44 ve %13,65 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kış şartlarındaki deneylerde 769 W/m^2, % 43,47 ve %13,5 olduğu görülmektedir. Ortalama ışınımın sonbaharda yapılan deneylerde kışın yapılan değerlerde göre daha yüksek olmasına rağmen, kışın yapılan deneylerde termal verimin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kışın yapılan deneylerde debinin arttırılmasıyla termal verimde %10 civarında iyileşme saptanmıştır. Ayrıca, daha düşük solar radyasyon değerine rağmen, çevre havası sıcaklığının kışın daha düşük olmasından dolayı PV verimde de iyileşme görülmüştür.

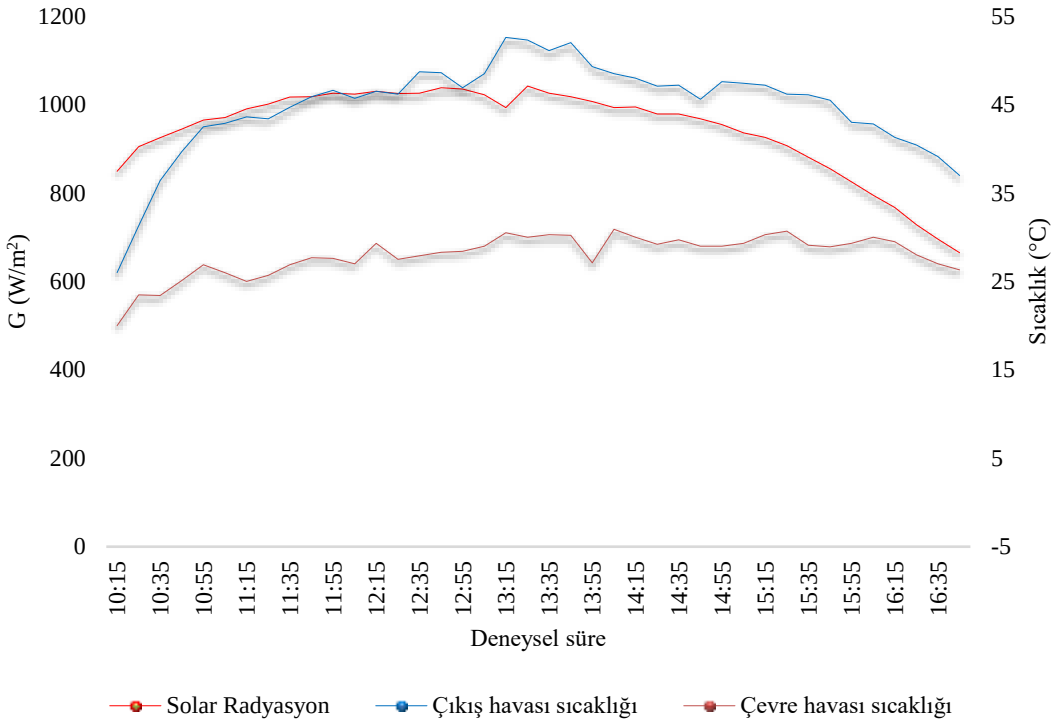
Şekil 5.5'te güneş radyasyonun, çevre havası ve panel çıkış havası sıcaklığına göre değişimi görülmektedir. Güneş radyasyon artışına paralel olarak çıkış havası sıcaklığının arttığı görülmektedir. Güneş radyasyonunun 622-1069 W/m^2 aralığında olduğu deney şartlarında çevre havası sıcaklığı 20-31°C olarak ölçülmüştür. Ortalama çevre sıcaklığı 28°C olarak kaydedilmiştir. Bunlara karşılık olarak da panel çıkış havası sıcaklığının en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 49,5°C; 33°C; 44,6°C olarak ölçülmüştür.

PV/T sistemleri hem elektrik hem de ısı üretimi için tasarlanmış olsa da, bu cihazların diğer önemli uygulamalarından biri de sıcak hava sağlamalarıdır. Güneş radyasyonunun, ortam

sıcaklığının ve panel çıkış sıcaklığının deney süresince değişimi Şekil 5.6'da görülmektedir. Maksimum radyasyon değeri 1042 W/m^2 olarak ölçüldüğünde çevre havası sıcaklığı 30,5°C, minimum radyasyon 665 W/m^2 olarak ölçüldüğünde ise çevre sıcaklığının 20°C olduğu gözlenmiştir. Ortalama çevre sıcaklığı 28°C olarak kaydedilmiştir. Bunlara karşılık olarak da panel çıkış havası sıcaklığının en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 52,6°C; 26°C, 44,8°C olarak ölçülmüştür.



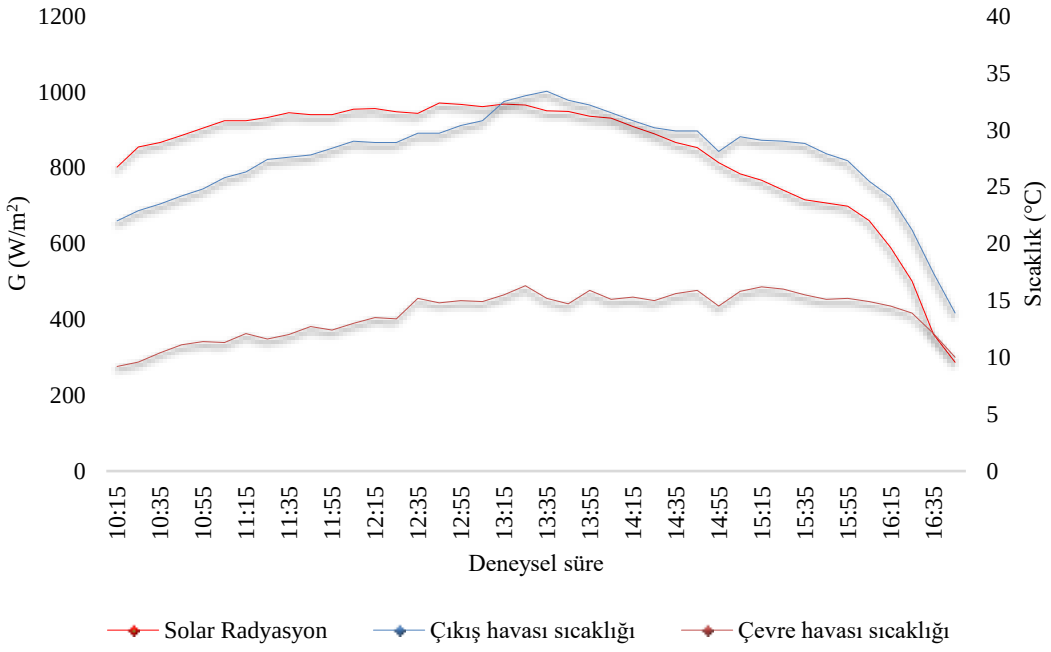
Şekil 5.5. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 11/09/2019



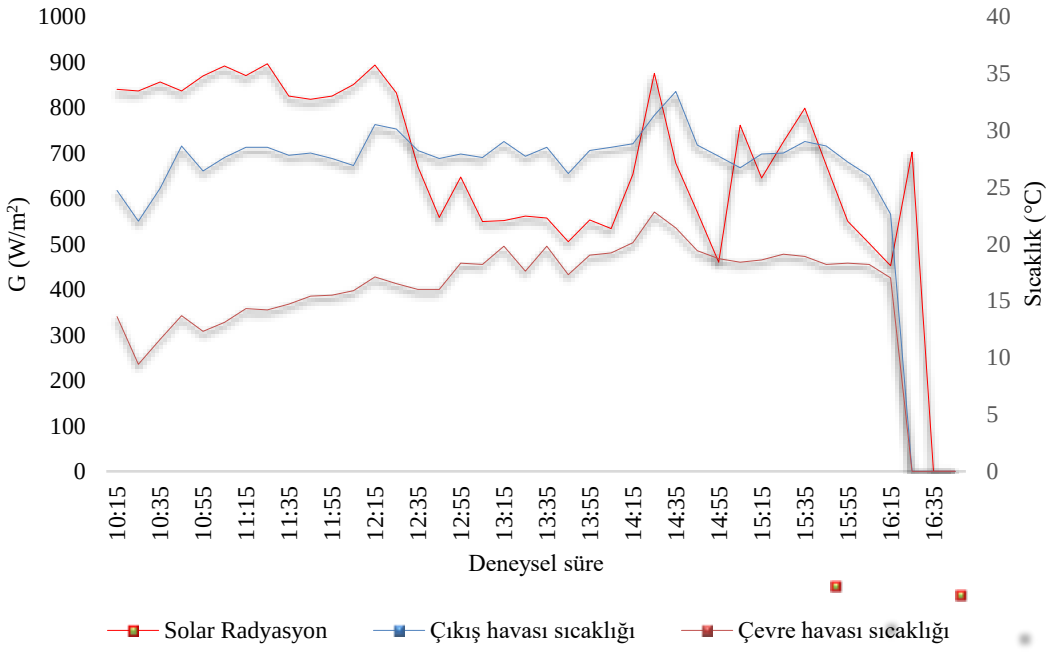
Şekil 5.6. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 12/09/2019

Şekil 5.7'de güneş radyasyonun zamanla değişimi gösterilmektedir. Ortam sıcaklığının ve panel çıkış havası sıcaklığının güneş radyasyonu arttıkça arttığı grafikten anlaşılmaktadır. Güneş ışınımının ve çevre havası sıcaklığının değişim aralığı sırasıyla 287-971 W/m^2 ve 9,2°C 16,3°C olarak ölçülmüştür. Ortalama çevre sıcaklığı 13,8°C olarak kaydedilmiştir. Bunlara karşılık olarak da panel çıkış havası sıcaklığının en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 33,4°C; 13,9°C; 27,7°C olarak ölçülmüştür.

Şekil 5.8'de en yüksek ve en düşük güneş radyasyon değeri sırasıyla 896 ve 452 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Ölçülen en yüksek ve en düşük çevre havası sıcaklığı 22,8°C ve 9,4°C'dir. . Ortalama çevre sıcaklığı 17°C'dir. Panel çıkış havası sıcaklığının en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla 33,4°C; 22°C; 27,8°C olarak ölçülmüştür.



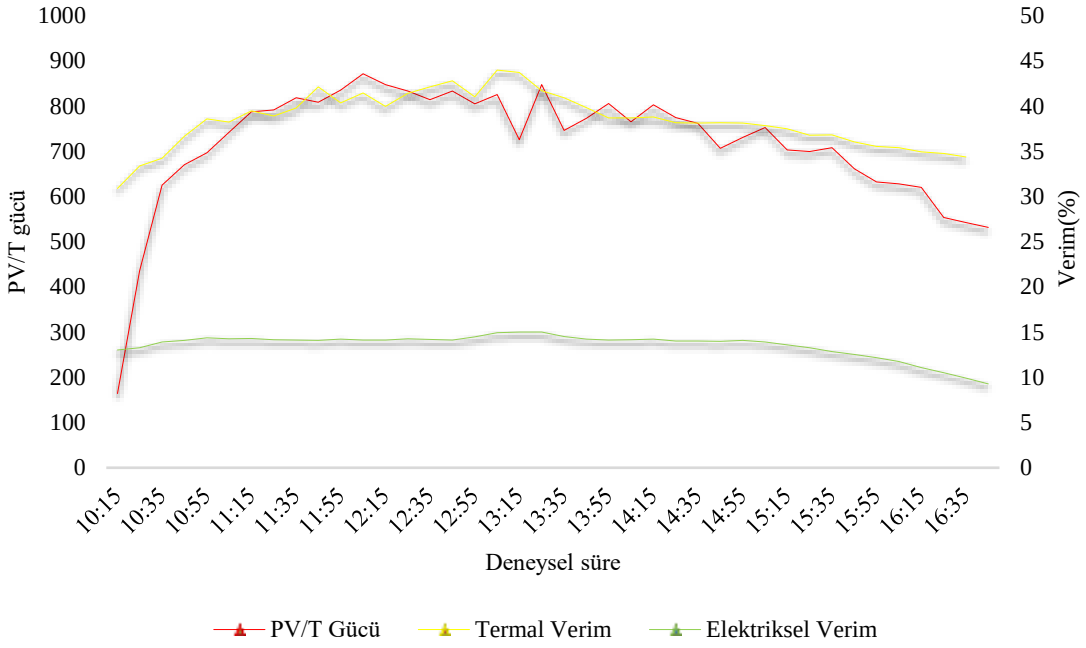
Şekil 5.7. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 03/11/2019



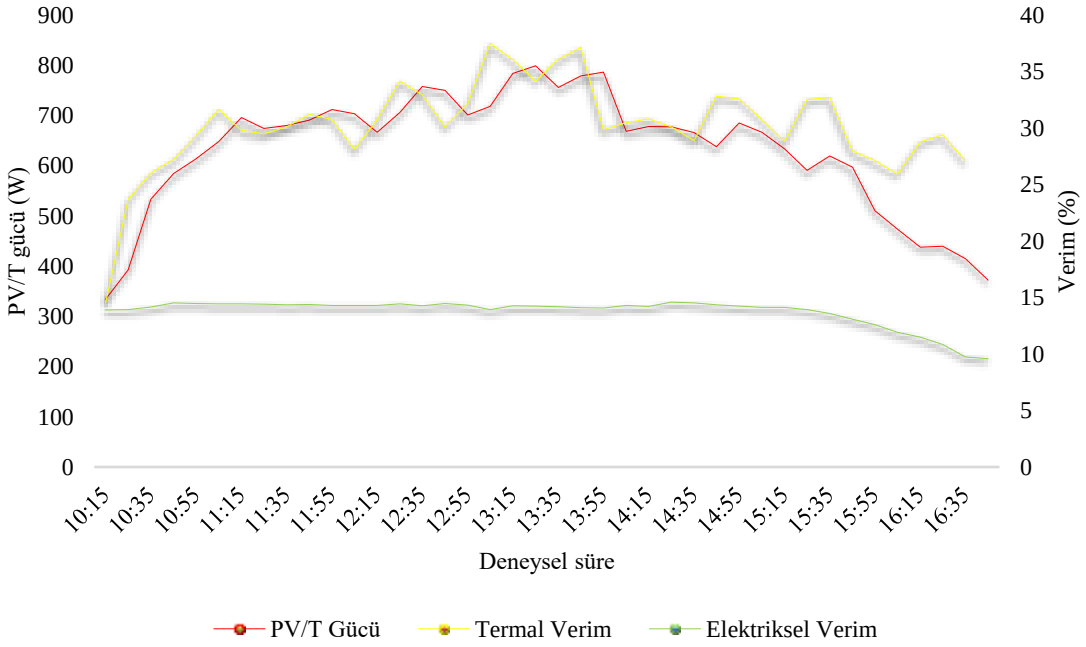
Şekil 5.8. Çevresel koşulların panel çıkış havası sıcaklığına etkisi 04/11/2019

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 PV/T'nin kullanılabilir gücünün (Watt) deney süresince ısıl ve elektriksel verimle değiştiğini göstermektedir. Şekil 5.9 ve 5.10 için PV/T'de kullanılabilir gücün en yüksek, en düşük ve ortalama değeri sırasıyla 871W, 164W, 717W; 799W, 334W, 631W olarak tespit edilmiştir. Buna göre, kullanılabilir gücün artışı ile termal verimliliğin

de arttığı gözlenmiştir. Elektriksel verimin çok büyük değişimler göstermediği grafikte, termal verim ile PV/T gücü arasında doğru orantılı olarak değişim olduğu gözlenmiştir.

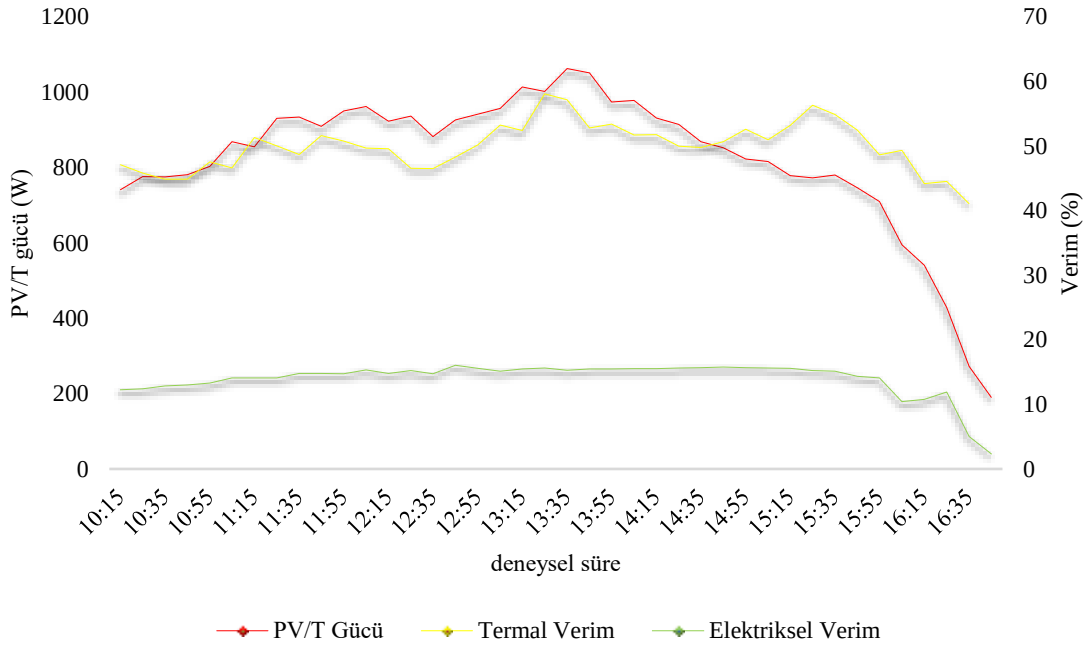


Şekil 5.9. Termal ve elektriksel verimle değişimi 11/09/2019

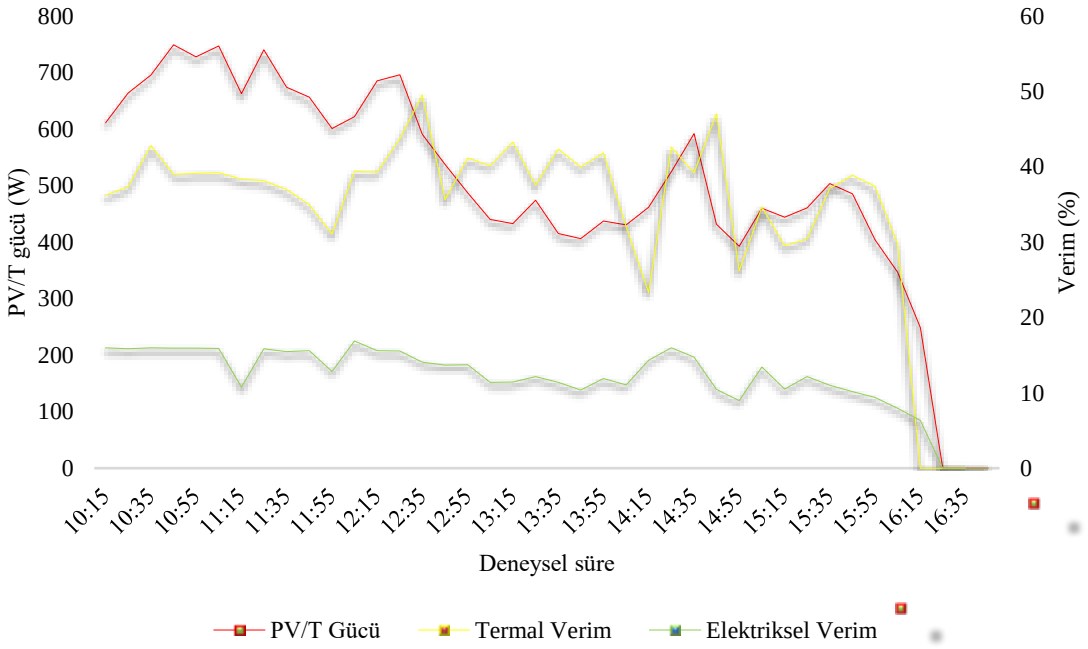


Şekil 5.10. Termal ve elektriksel verimle değişimi 12/09/2019

PV/T'nin verimi ve gücü (Watt) arasındaki ilişki Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir. Sırasıyla PV/T'de kullanılabilir gücün en yüksek, en düşük ve ortalama değeri 1055W, 188W, 818 W ve 749W, 249W ve 508W olarak tespit edilmiştir.

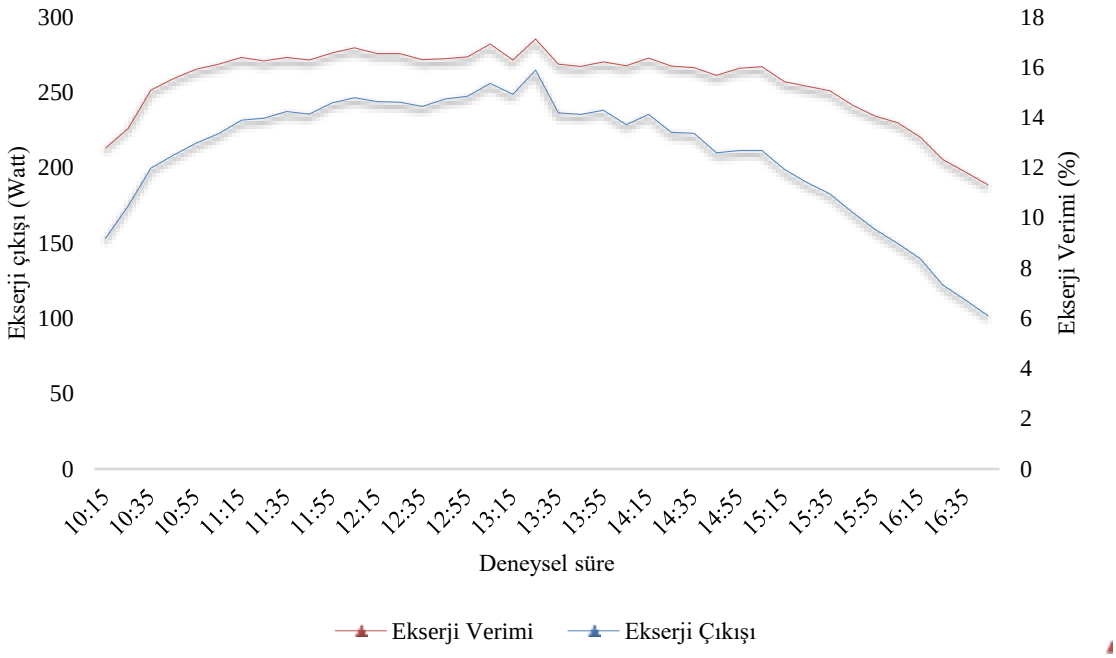


Şekil 5.11. Termal ve elektriksel verimle değişimi 03/11/2019

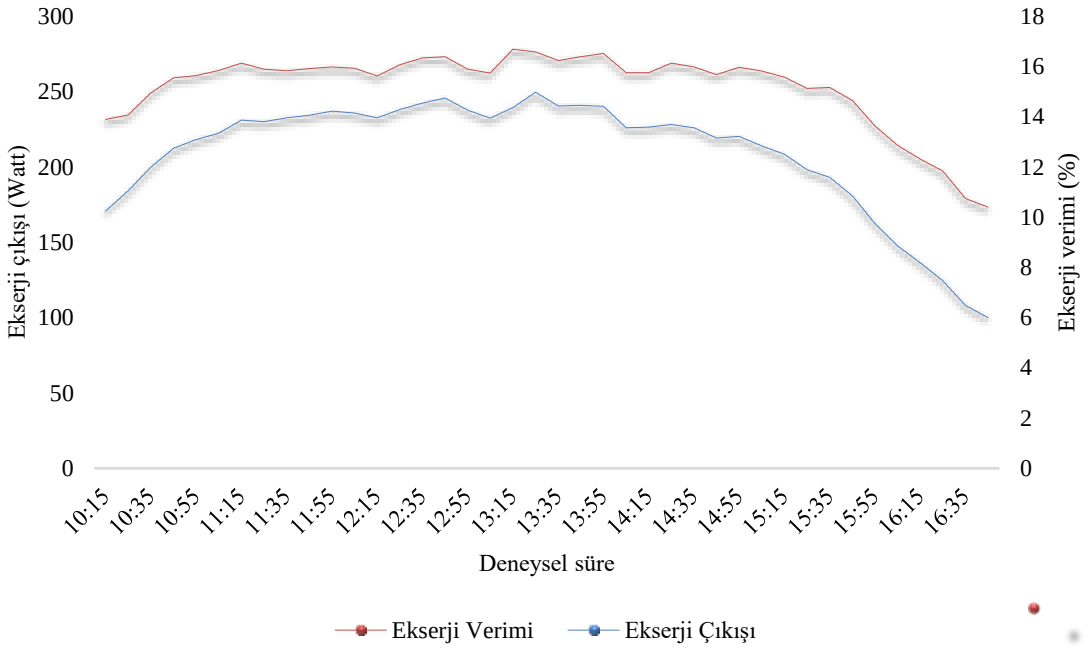


Şekil 5.12. Termal ve elektriksel verimle değişimi 04/11/2019

Sonbaharda yapılan birinci ve ikinci deneylere ait ekserji çıkışı ve ekserji verimliliğinin zamanla değişimi Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te görülebilmektedir. PV/T tarafından sağlanan maksimum, minimum ve ortalama ekserji çıkışı, sırasıyla 265W, 102W, 209W ve 250W, 100W ve 209W olarak tespit edilmiştir. Ekserji verimi ise, sırasıyla, %17,11; %11,30; %15,43 ve %16,68; %10,39 ve %15,18 olarak tespit edilmiştir. Ancak, güneş ışınımının azalmasına bağlı olarak artan geri dönüşümsüzlük nedeniyle ekserji verimliliği düşmeye devam eder. Bu, büyük ölçüde daha fazla ekserji hasarına neden olur. Bu nedenle, yüksek güneş ışınımında daha yüksek ekserji verimliliği sağlanabilir.

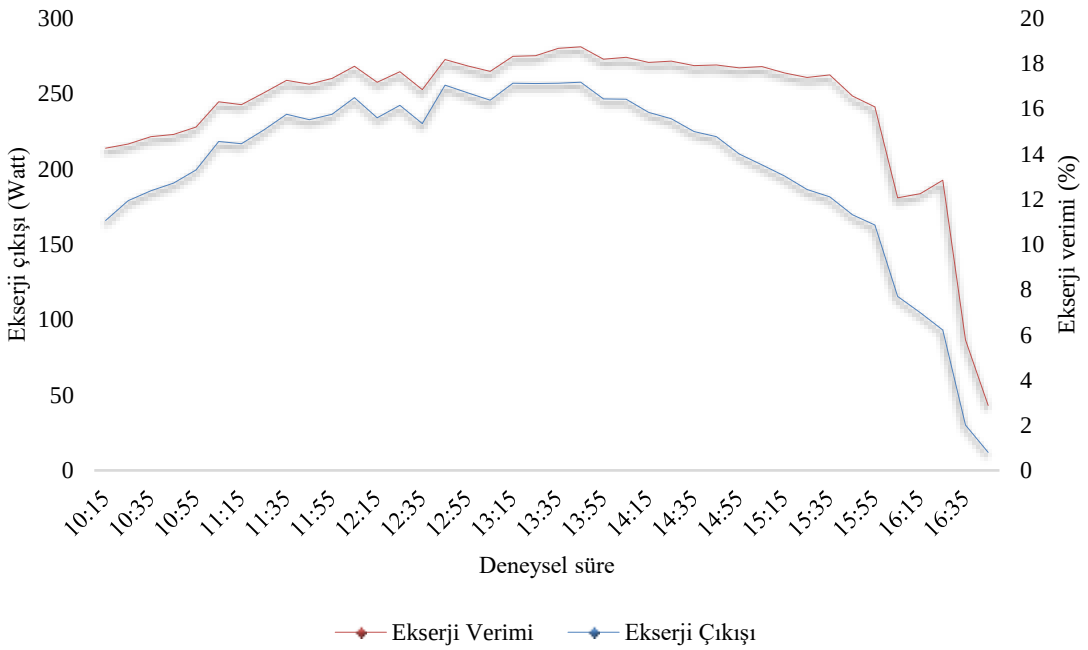


Şekil 5.13. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 11/09/2019

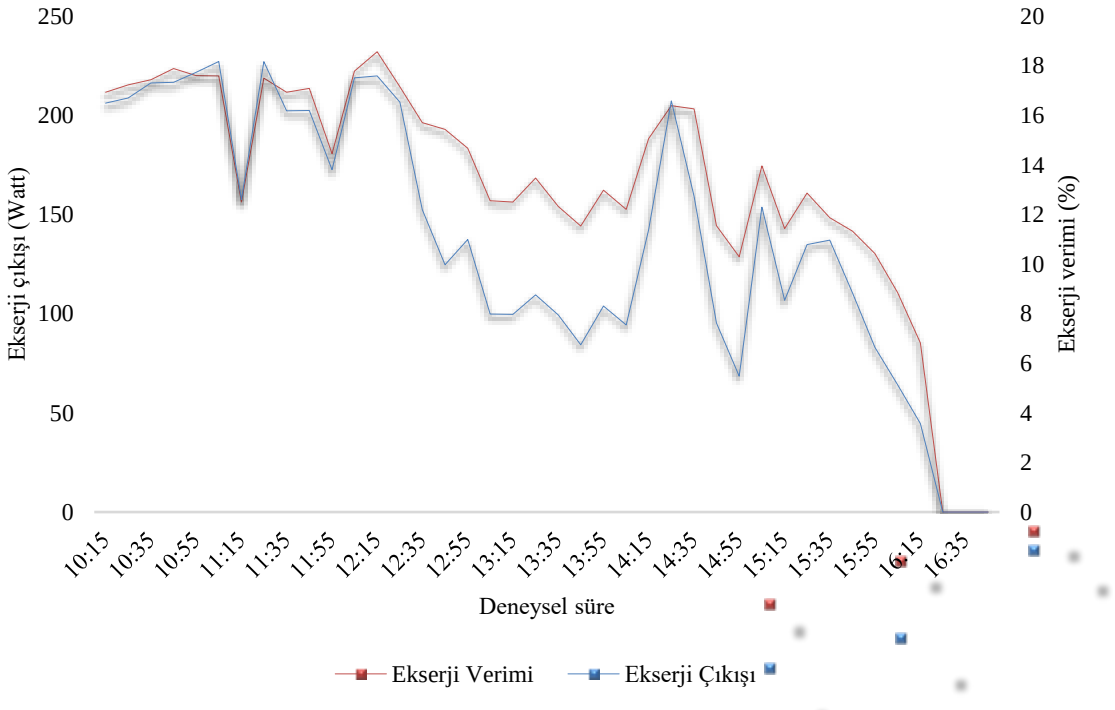


Şekil 5.14. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 12/09/2019

Kış aylarında yapılan deneylere ait ekserji çıkışı ve ekserji verimliliği Şekil 5.15 verilmiştir. PV/T panelin maksimum, minimum ve ortalama ekserji çıkışı, 257W, 12W ve 202W; ekserji verimi ise %18,87; %2,87 ve %16,15 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.16'da ise bu değerler 227W, 14W ve 146W; ekserji verimi ise %17,89; %1,39 ve %13,91 olarak tespit edilmiştir.



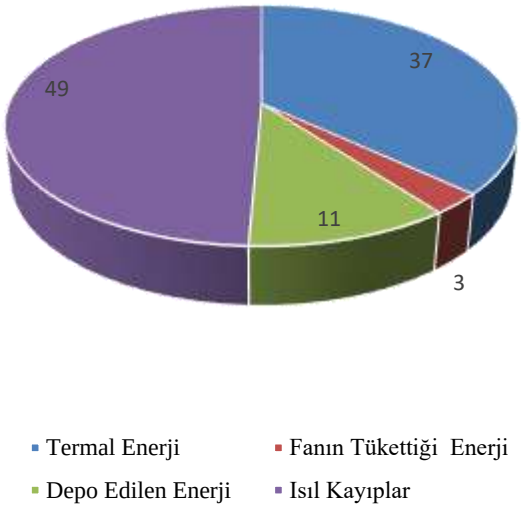
Şekil 5.15. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 03/11/2019



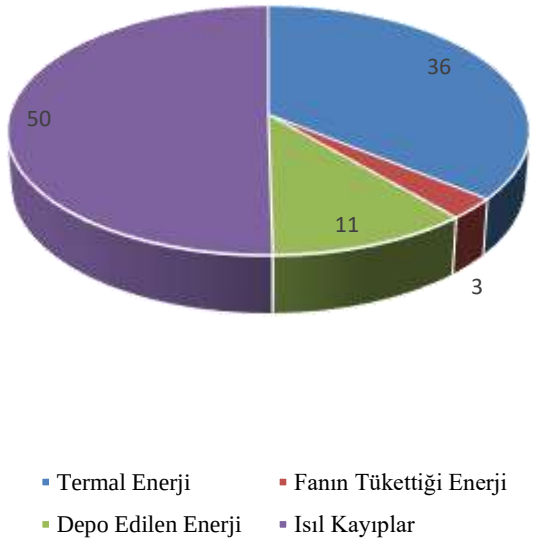
Şekil 5.16. Ekserji çıkışının ekserji verimi ile değişimi 04/11/2019

Şekil 5.17, güneş enerjisinden elde edilen toplam enerjinin dağılımını göstermektedir. Gelen enerjinin bir kısmı havayı ısıtmak için kullanılırken, bir kısmı elektrik üretiminde kullanılmıştır. Fanın harcadığı enerji miktarı üretilen elektrik enerjisinden karşılanarak kendi kendine yetebilen bir sistem tasarlanmıştır. Isıl kayıplar hesaplandıktan sonra ise kullanılmayan enerji ise akülerde depo edilmiştir. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 3399 W (%33.96), 1261 W (%13,71), 260 W (%2,83), 1001 W (%10,88) ve 3277 W (%35,62) olarak hesaplanmıştır (11/09/2019)

Panel tarafından absorbe edilen güneş enerjisinin dağılımı Şekil 5.18'de verilmiştir. Grafikte ısıl kayıpların absorbe edilen enerjinin yarısının oluşturduğu görülmektedir. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 3358 W (%35,91), 1295 W (%13,85), 260 W (%2,78), 1035 W (%11,07) ve 3277 W (%36,39) olarak hesaplanmıştır.

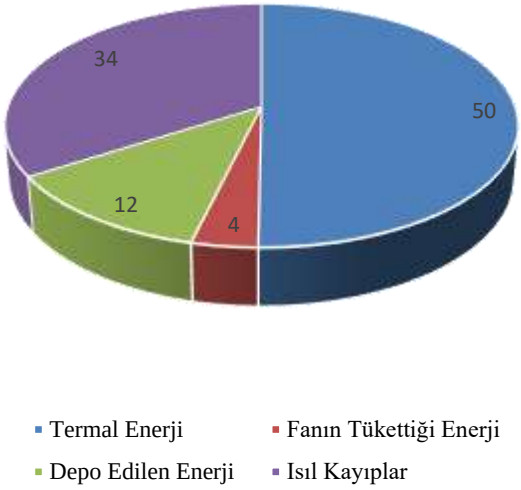


Şekil 5.17. Güneş enerjisinin dağılımı 11/09/2019



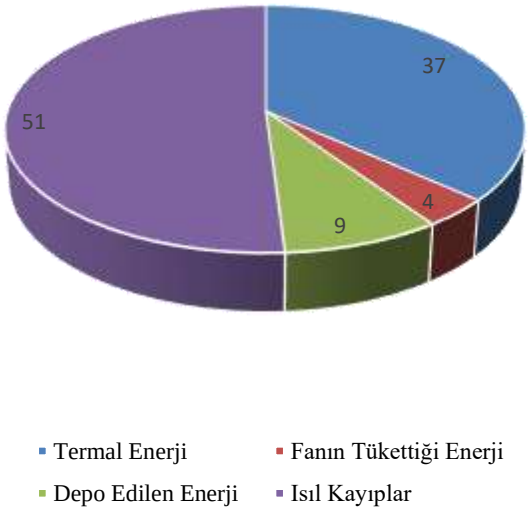
Şekil 5.18. Güneş enerjisinin dağılımı 12/09/2019

Güneş enerjisinin dağılım grafiği Şekil 5.19'da görülmektedir. Buna göre, ısıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 4160 W (%50,17), 1304 W (%15,73), 300 W (%3,62), 1004 W (%12,11) ve 1523 W (%18,37).olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.19. Güneş enerjisinin dağılımı 03/11/2019

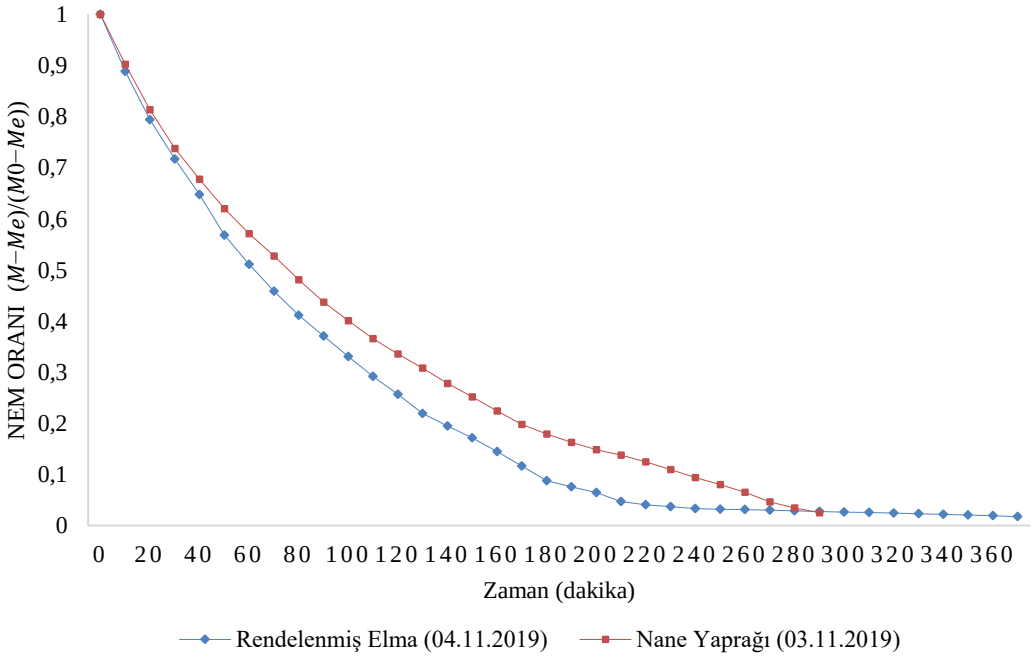
Şekil 5.20, güneş enerjisinden elde edilen toplam enerjinin dağılımını göstermektedir. Gelen enerjinin bir kısmı havayı ısıtmak için kullanılırken, bir kısmı elektrik üretiminde kullanılmıştır. Fanın harcadığı enerji miktarı üretilen elektrik enerjisinden karşılanarak kendi kendine yetebilen bir sistem tasarlanmıştır. Isıl kayıplar hesaplandıktan sonra ise kullanılmayan enerji ise akülerde depo edilmiştir. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 2379 W (%34,22), 861 W (%12,39), 260 W (%3,74), 601 W (%8,65) ve 2851 W (% 41) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.20. Güneş enerjisinin dağılımı 04/11/2019

5.2. Kurutma Deneylerinin Sonuçları

Nem içeriğinin zaman göre değişim eğrisi Şekil 5.21'da verilmiştir. Kurumaya son verilen noktadaki denge nem içeriği elma ve nane yaprağı için sırasıyla için 0,017088 gsu / g katı madde ve 0,025153 gsu/gkatı madde olarak kullanılmıştır. Her bir zaman dilimi için boyutsuz nem oranları $((M-M_e)/(M_0-M_e))$ belirlenmiştir. Şekil 4' te elma dilimlerinin ortalama 27,7°C'de 0,036424 kg/s debide, nane yapraklarının ise 27,8°C'de 0,045936 kg/s kurutulan örneklerin zamanla boyutsuz nem oranındaki değişim görülmektedir.

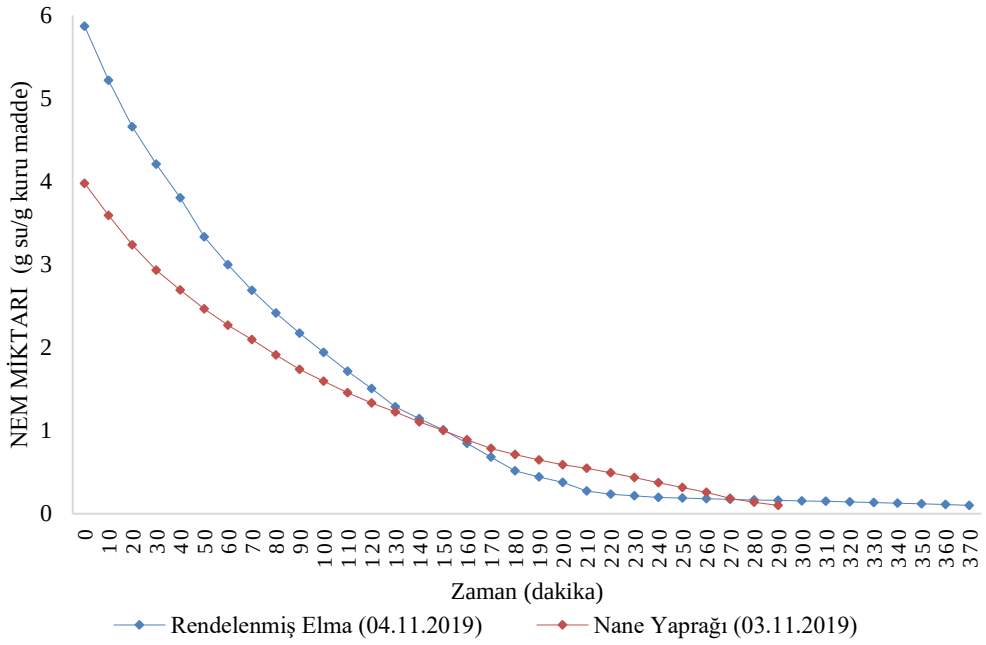


Şekil 5.21. Nem oranının zamana göre değişimi

Şekil 5.22'de elma dilimlerinin ve nane yapraklarının kurutulması sırasında elde edilen ağırlık kayıplarından, su miktarının kuru madde miktarına oranlanmasıyla bulunan nem içeriğinin zamanla değişimi görülmektedir. Nem içeriğinin zamana karşı deney verileri çizildiği zaman elde edilen eğrinin kurutma eğrilerinin genel karakteristiği olan eksponansiyel bir formda olduğu belirlenmiştir.

Grafiklerden de görüldüğü gibi, kurutma süreleri, değişik kurutma havası giriş sıcaklıklarına ve kurutma havası debilerine bağlı olarak 370-290 dakika arasında değişmiştir. Sabit kurutma havası debilerinde yapılan kurutmada sıcaklık arttıkça nem içeriğinde belirgin bir şekilde daha hızlı bir azalma görülmekte, ayrıca kurutma süresi de azalmaktadır.

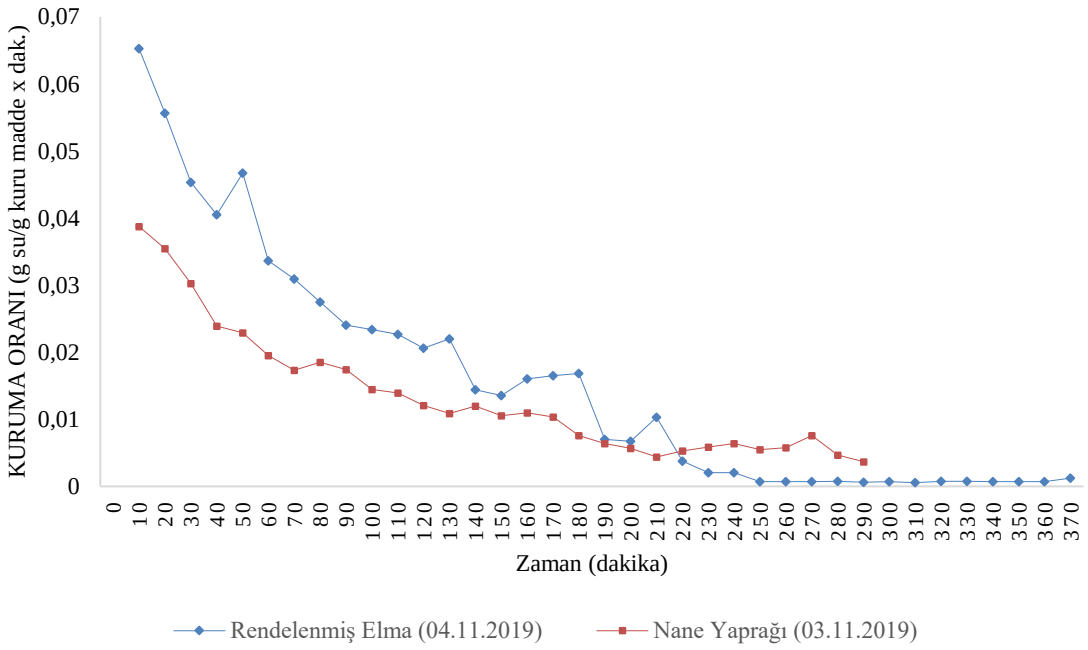
Kuruma hızındaki artışta kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası hızına göre daha etkili olmaktadır. Kurumanın başlangıç aşamalarında hava hızının etkisi daha fazla olmakta, ileri ki aşamalarda bu etkinin azaldığı gözükmektedir. Ancak grafiklerden kurutma havası hızı arttıkça kurutma süresinde bir miktar azalma olduğu anlaşılmaktadır.



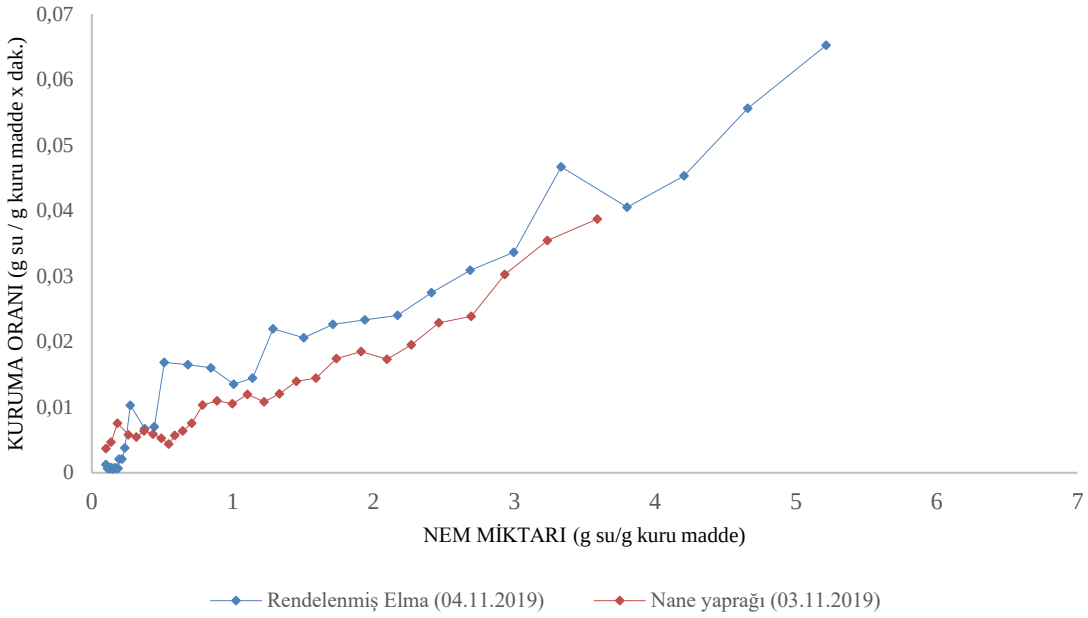
Şekil 5.22. Kuru baza göre nem içeriği

Sabit kurutma havası hızı ve farklı kurutma havası giriş sıcaklıkları için kuruma hızının kuruma süresiyle değişimi Şekil 5.23'de; kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi ise Şekil 5.24'de verilmiştir. Kuruma olayı azalan kuruma hızı periyodunda gerçekleşmiş, deneysel verilerde sabit kuruma hızı periyodu gözlenmemiştir. Kurutma havası sıcaklığı ve hızı arttıkça nem içeriğinde ve kuruma süresinde belirgin bir şekilde hızlı bir azalma görülmüş, ayrıca kuruma hızı da artmıştır (Şekil 5.24). Ayrıca kurutma olayının başlangıç safhalarında kuruma hızı değişkenlik göstermekte, belirli bir süreden sonra lineer bir azalma göstermektedir. Deney sonuçlarına göre, sıcaklık artışının kuruma hızı üzerindeki bu etkisi, sıcaklık artışının doğal bir sonucu olarak kurutma havası bağıl neminin düşmesinden ve dolayısıyla difüzyon olayının hızlanmasından kaynaklanmaktadır. Kuruma hızındaki artışta hava hızının etkisi hava sıcaklığına göre daha az olmuştur. Kurutulan maddenin yüzeyinde kuruma sırasında daima durgun bir buhar filmi oluşmaktadır. Hava hızı, bu buhar filmini devamlı olarak sürüklemek suretiyle kuruma hızını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır.

Nem içeriği–kuruma hızı ilişkisinde ise sabit kurutma havası giriş sıcaklığında kurutma havası hızının artmasıyla ve kurutma havası giriş sıcaklığının artmasıyla doğrunun eğimi artmıştır.



Şekil 5.23. Kuruma hızının zamana göre değişimi



Şekil 5.24. Kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi

5.2. Belirsizlik Analizi Sonuçları

Deneyler sonucunda elde edilen çıktılar standarda uygun ölçüm cihazları ile tespit edilmiştir. Standartlara uygun cihazlara, uygun ortam koşullarına sahip olunsa da verilerde çeşitli hatalar oluşabilir. Cihaz seçimi, deney şartları, kullanılan cihazların kalibrasyonu, verilerin okunması, ölçüm aletlerinin bağlantı noktaları ve deneyin yapıldığı ortam gibi deney sonuçlarını etkileyen (hata ve belirsizliklere yol açan) birçok parametre vardır. Bu nedenle deneysel çalışmada kullanılan cihaz ve ekipmanlardan kaynaklanan bu gibi hatalar, belirsizlik analizi ile çözümlenmiştir. Belirsizlik analizi, istenen deneysel standartların sağlanması açısından önemlidir. Toplam belirsizlik aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri ve belirsizlikleri

Sıcaklık ölçümünden kaynaklı hatalar $W_{sıcaklık}$:				Toplam belirsizlikler (W_R)
Termokupldan kaynaklı belirsizlikler:	$W_{sıcaklık1}$	±0,1	°C	$\pm 0{,}304$°C
Bağlantı noktasından kaynaklı belirsizlikler:	$W_{sıcaklık2}$	±0,1	°C	
Fan girişinden kaynaklı belirsizlikler:	$W_{sıcaklık3}$	±0,25	°C	
Okumadan kaynaklı belirsizlikler:	$W_{sıcaklık4}$	±0,1	°C	
Hız ölçümünden kaynaklı hatalar $W_{hız}$:				
Anemometre hassasiyetinden kaynaklı belirsizlikler:	$W_{hız1}$	±0,03	m/s	± 0.104 m/s
Kaçaklardan kaynaklı hatalar:	$W_{hız2}$	±0,1	m/s	
Çevre hava sıcaklığı kaynaklı hatalar $W_{çevrehavasıc.}$:				
Termohigrometre hassasiyetinden kaynaklı hatalar:	$W_{çevrehavasıc.1}$	±0,1	°C	$\pm 0{,}1414$ °C
Okumadan kaynaklı hatalar:	$W_{çevrehavasıc.2}$	±0,1	°C	
Bağıl nem ölçümünden kaynaklı hatalar $W_{bağılnem}$:				
Termohigrometre hassaiyetinden kaynaklı hatalar:	$W_{bağılnem1}$	±2	RH	± 2.236 %RH
Okumadan kaynaklı hatalar:	$W_{bağılnemy2}$	±1	RH	
Ürün ağırlığı ölçümünden kaynaklı hatalar $W_{\text{ürün}ağırlığı}$:				
Terazinin hassasiyetinden kaynaklı hatalar:	$W_{\text{ürün}ağırlığı1}$	±0,01	g	$\pm 0{,}5002$ g
Okumadan kaynaklı hatalar:	$W_{\text{ürün}ağırlığı2}$	±0,01	g	
Çevre kaynaklı hatalar:	$W_{\text{ürün}ağırlığı3}$	±0,5	g	
Kanal kesidinden kaynaklı hatalar $W_{kanalkesit}$:				
Üretimden kaynaklı hatalar:	$W_{kanalkesit1}$	±0,0005	m	$\pm 0{,}0005$ m
Solarimetreden kaynaklı hatalar $W_{solarimetre}$:				
Cihaz hassasiyetinden kaynaklı hatalar:	$W_{solarimetre1}$	±5	W/m^2	$\pm 5{,}09$ % W
Okumadan kaynaklı hatalar:	$W_{solarimetre2}$	±1	W/m^2	/m2

5.2.1. Sıcaklık Ölçümünden Kaynaklı Hatalar

Sıcaklık ölçümlerinin belirsizliği aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır. Hesaplanan belirsizlik aşağıdaki bağıntıda hesaplanmıştır. Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan hata (W_{temp1}), 0,5 °C, Bağlantı elemanları ve noktalarından kaynaklanan hata (W_{temp2}), 0,1°C, Fan

girişinde sıcaklık ölçümünde yapılabilecek ortalama hata (W_{temp3}), 0,25°C, Dijital termometreden kaynaklanan hata (W_{temp4}). 0,1°C alındığında toplam belirsizlik aşağıdaki hesaplanmıştır.

$$W_{sıcaklık} = [(W_{sıcaklık1})^2 + (W_{sıcaklık2})^2 + (W_{sıcaklık3})^2 + (W_{sıcaklık4})^2]^{1/2}$$

$$W_{sıcaklık} = [(0{,}1)^2 + (0{,}1)^2 + (0{,}25)^2 + (0{,}1)^2]^{1/2}$$

$$W_{sıcaklık} = 0.304°\text{C}$$

5.2.2. Hız için hata

Akış hızını ölçmek için debimetre cihazı kullanılmıştır. Anemometrenin hassasiyetinden kaynaklanan hata ($W_{velocity1}$) ve debi kaçaklarından kaynaklanan belirsizlikler $W_{velocity2}$) sırasıyla 0,03; 0,1 m/s'dir. Bu değerlere göre debimetrenin belirsizliği aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır.

$$W_{hız} = [(W_{hız1})^2 + (W_{hız2})^2]^{1/2}$$

$$W_{velocity} = [(0{,}03)^2 + (0{,}1)^2]^{1/2}$$

$$W_{hız} = 0{,}1044\ \text{m/s}$$

5.2.3. Çevre sıcaklığı için hata

Çevre sıcaklığındaki belirsizlikler Termohigrometrenin hassasiyetinden ($W_{ambtemp1}$) ve okumadan ($W_{ambtemp2}$) kaynaklanan hatalardır. Bunların belirsizliği sırasıyla 0,5 ve 0,01 °C'dir. Bu değerlere göre toplam belirsizlik aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W_{çevrehavasıc.} = [\left(W_{çevrehavasıc1}\right)^2 + \left(W_{çevehavasıc.2}\right)^2]^{1/2}$$

$$W_{çevrehavasıc.} = [(0{,}1)^2 + (0{,}1)^2]^{1/2}$$

$$W_{çevrehavasıc.} = 0{,}1414\ °\text{C}$$

5.2.4. Bağıl nem için hata

Bağıl nemin belirsizliği Termohigrometrenin hassasiyetinden ($W_{rbağılnem1}$) ve okumadan ($W_{bağılnem2}$) kaynaklanan hatalara bağlıdır. Bunlar sırasıyla 0,02 ve 0,01 RH'tır. Toplam belirsizlik aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W_{bağılnem} = [(W_{bağılnem1})^2 + (W_{bağılnem2})^2]^{1/2}$$

$$W_{bağılnem} = [(2)^2 + (1)^2]^{1/2}$$

$$W_{bağılnem} = \%2{,}24 \text{ RH}$$

5.2.5. Ürün ağırlığı için hata

Ürün ağırlığının belirsizliği teraziden kaynaklı ($W_{ürünağırlığı1}$), okuma kaynaklı ($W_{ürünağırlığı2}$) ve çevre şartlarından kaynaklı ($W_{ürünağırlığı3}$) hatalara bağlıdır. Bunlar sırasıyla 0,01; 0,01 ve 0,5 gr'dır. Toplam belirsizlik aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W_{ürünağırlığı} = [(W_{ürünağırlığı1})^2 + (W_{ürünağırlığı2})^2 + (W_{ürünağırlığı3})^2]^{1/2}$$

$$W_{ürünağırlığı} = [(0{,}01)^2 + (0{,}01)^2 + (0{,}5)^2]^{1/2}$$

$$W_{ürünağırlığı} = 0{,}5002 \text{ gr}$$

5.2.6. Kanal kesiti için hata

İmalattan kaynaklı hata 0,0005 m'dir. Belirsizliği de aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W_{kanalkesit} = [(W_{kanalkesit1})^2]^{1/2}$$

$$W_{kanalkesit} = [(0{,}0005)^2]^{1/2}$$

$$W_{kanalkesit} = 0{,}0005 \text{ m}$$

5.2.7. Solar metre için hata

Işınımı ölçmek için kullanılan solarimetreden kaynaklı belirsizliğin hesaplanmasında solarimetre cihazından kaynaklı belirsizliği ($W_{solarimetre1}$) 0,05 W/m^2; solarimetrede şiddetin okunması sırasında kaynaklanan belirsizlik ($W_{solarimetre2}$) 1 W/m^2'dir. Toplam belirsizlik aşağıdaki $W_{solmeter}$ gibi hesaplanmıştır.

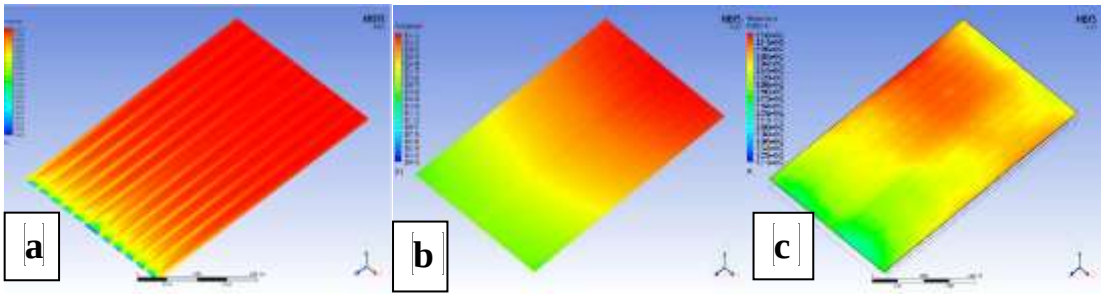
$$W_{solarimetre} = [(W_{solarimetre1})^2 + (W_{solarimetre2})^2]^{1/2}$$

$$W_{solarimetre} = [(5)^2 + (1)^2]^{1/2}$$

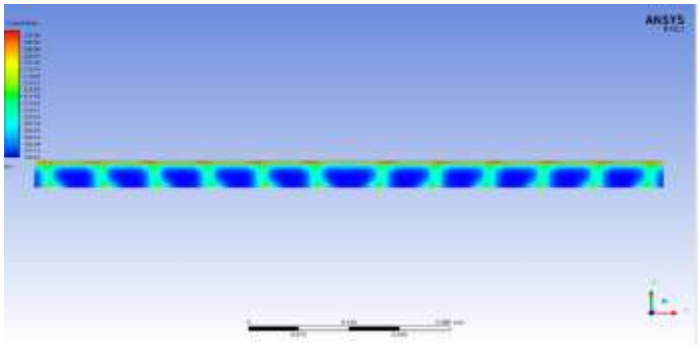
$$W_{solarimetre} = 5{,}09\ \mathrm{W/m^2}$$

5.3. Sayısal Analiz Sonuçları

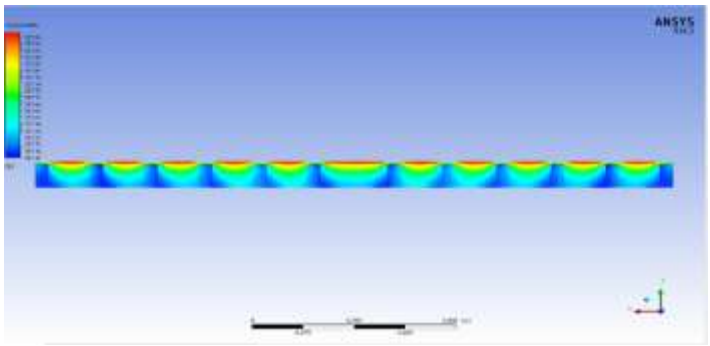
Şekil 5.25'da 11/09/2019 günü yapılan deneyin başlangıç ve sınır şartları baz alınarak HAD tarafından elde edilen PV yüzey sıcaklığını sırasıyla k-epsilon, k-omega ve SST türbülans modellerine göre sonuçlarını göstermektedir. Buna göre, ortalama PV sıcaklığı 329.1 K olarak modellendi. Bu sıcaklık değeri, deneysel olarak ölçülen değerden (328,09) yaklaşık 1,1 derece daha yüksektir. Verim değerlerinde bu oran % 1,4 olarak hesaplanmıştır. Şekilden görülebileceği gibi, bakır kanatçıkların monte edildiği yerlerin diğer PV noktalarından daha soğuk olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bakır kanatçıklarının PV'den daha soğuk olmasıdır. Şekil 5.26 ve 5.27, sırasıyla PV/T panelin giriş ve çıkış havası sıcaklıklarını göstermektedir. Sayısal analiz sonucunda, giriş ve çıkış havası sıcaklıkları sırasıyla 294-329 K olarak hesaplanmıştır. Şekilden görülebileceği gibi, hava sıcaklığının PV'ye yakın yerlerdeki diğer noktalardan daha sıcak olduğu görülmektedir. Şekil 5.28 kanatçıklardaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Buna göre, kanatçık sıcaklığı giriş havası sıcaklığına yakın olduğunda, kanatçıkların sıcaklığının çıkışa doğru arttığı görülmektedir.



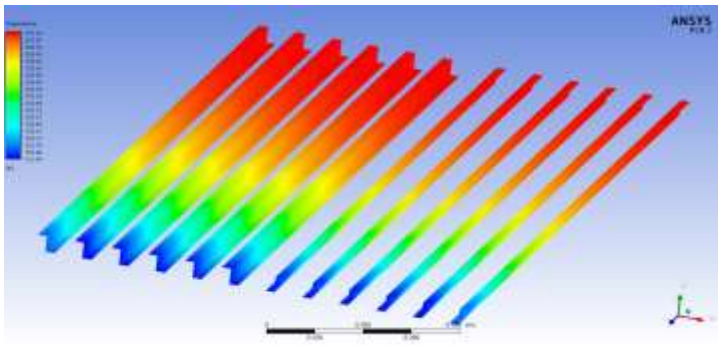
Şekil 5.25. PV Panel yüzey sıcaklığının dağılımı (a: kepslion, b: k omega, c: SST)



Şekil 5.26. k epsilon türbülans modeli PV/T giriş havası sıcaklığı dağılımı



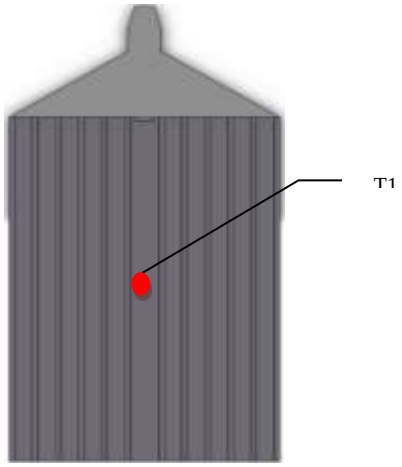
Şekil 5.27. k epsilon türbülans modeli PV/T çıkış havası sıcaklığı dağılımı



Şekil 5.28. k epsilon türbülans modeli PV/T kanatçıkların sıcaklık dağılımı

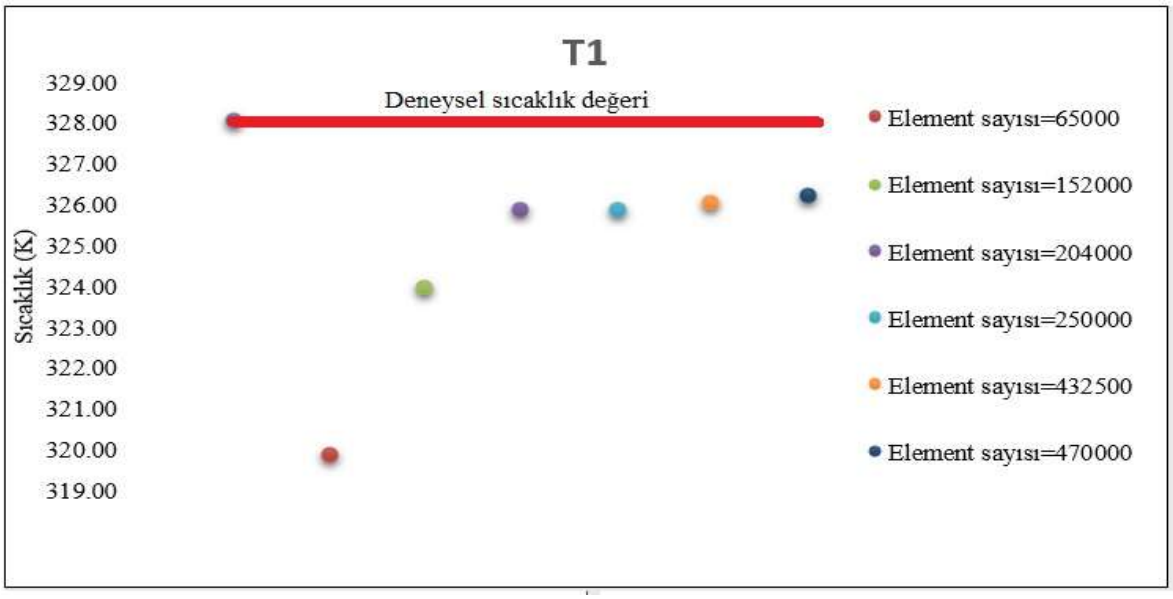
5.4. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Doğrulanması

PV/T panelin içindeki havanın ısıtılması tıpkı seralarda ısıtılan hava ile benzerlik gösterir. Paneli tarafından absorbe edilen güneş radyasyonu havanın ısıtılmasında oldukça önemlidir [158]. PV/T panelin giriş havası sıcaklığı, çevre hava sıcaklığı ile aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. HAD analizinde verifikasyonun sağlanması için sıcaklığın ölçüldüğü nokta, (termokuplun bulunduğu yer) Şekil 5.29'de gösterilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar sayısal analiz ile uyumludur.



Şekil 5.29. PV/T paneldeki ölçüm noktası

Ölçüm noktasına göre (T1) verifikasyonu sağlanan HAD çalışmasında deneysel değere en yakın element sayısının 470000 ve en uygun türbülans modelinin ise k-epsilon olduğu görülmektedir. Bu nedenle, tüm geometri için bu ağ numarası seçildi ve bu ağ yapısı kullanılarak sayısal sonuçlar elde edildi. Şekil 5.30, deneysel ve sayısal hesaplamaların doğrulanması için elde edilen sıcaklık verileri gösterilmektedir. Bu grafiğe göre, ağ sayısı 65000 civarında olduğunda, yaklaşımın deneysel değere oranı %2,5 ve ağ sayısı 470000'e yükseldiğinde, yaklaşım değeri %0,58'e düştüğü görülmüştür.



Şekil 5.30. Element sayısının deneysel sıcaklık değerine göre değişimi

Çizelge 5.2'de farklı türbülans modelleri seçilerek elde edilen sonuçlar görülmektedir. Deneysel değere yaklaşma oranı k-epsilon, k-omega, ve SST için sırasıyla %0,58; %0,82 ve %1,13 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2. Farklı türbülans model sonuçları

	k-epsilon	k-omega	SST
Deneysel sıcaklık değeri	328,09	328,09	328,09
Element sayısı=65000	319,88	315,66	314,21
Element sayısı=152000	323,96	319,47	318,20
Element sayısı=204000	325,91	321,68	321,16
Element sayısı=250000	325,91	324,79	318,20
Element sayısı=432500	326,06	325,06	323,96
Element sayısı=470000	326,20	325,40	324,38
hata oranı (%)	0,58	0,82	1,13

Çizelge 5.3'de çalışma akışkanı olarak havanın seçildiği PV/T panellerin ekserji verimleri gösterilmektedir. Bu çalışmadaki ekserji verimleri diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak diğer çalışmalardan daha yüksek ekserji verimine sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.3. Ekserji verimlerinin literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılması.

PV/T tipi	Çalışma akışkanı	Ekserji verimi	Referens
Sırsız cam	hava	10,75%	[159, 160]
Cam-cam	hava	10,45%	[160, 161]
Sırsız ısı eşanjörlü	hava	5,50%	[160, 162]
Sırsız sera etkili	hava	4%	[160, 163]
Çift sırlı düzlem	hava	3,90%	[160, 164]
BIPV/T	hava	2,12%	[160, 165]
Çift sırlı	hava	2%	[160, 166]
Cam-cam	*hava*	*17,12%-18,05%*	*Bu çalışma*

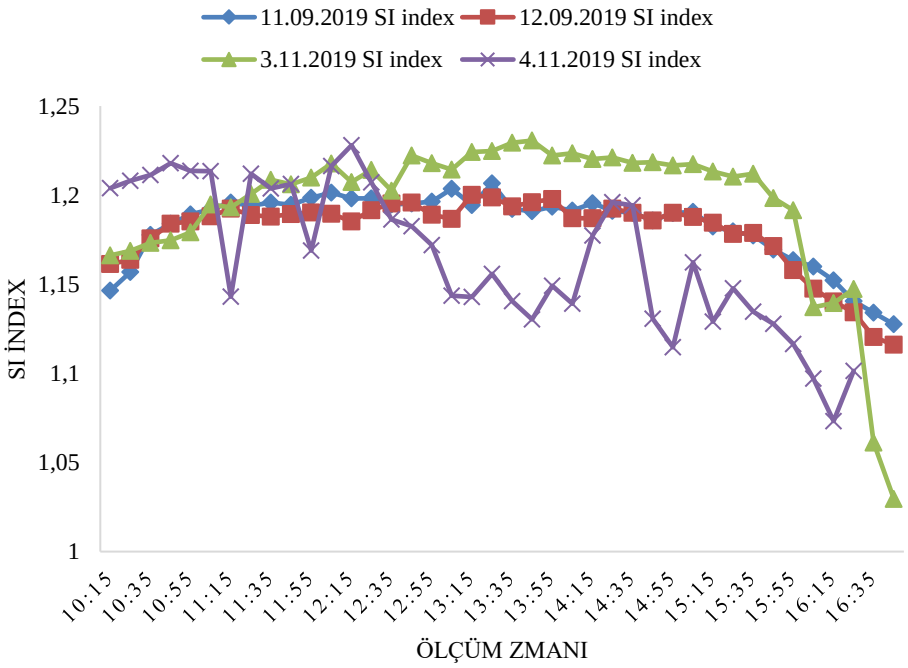
Vücudumuzdaki organların her biri ayrı ayrı çalışır. Kan, bu işlevleri yerine getirmek için çalışan bir sıvıdır. PV/T'de çalışan sıvılar tıpkı kan gibidir ve en popüler olanları hava ve sudur [167]. PV/T toplayıcının performansını artırmak için çeşitli tasarımlar geliştirilmiştir. Bunlar bir cam kapağın yokluğu, tek bir kapağın kullanılması, metal kanatçıkların takılması ve metal kanatçıkların montajı olarak listelenebilir. Ayrıca, oluklu sac ve metal hava tüpleri içeren PVT hava toplayıcılarının gelişmiş modelleri önerilmiştir [168]. PV/T paneller, artan genel verim nedeniyle güneş enerjisinden yararlanmanın daha iyi bir yolunu sunar. Hem hava hem de su, sırasıyla PVT/hava ve PVT/su sistemlerini sağlayan pratik PV/T güneş panellerinde ısı transfer sıvıları olarak kullanılmıştır. PVT/su sistemleri, suyun genel termo-fiziksel özelliklerinden, genellikle düşük olanlardan daha yüksek olması nedeniyle PVT/hava sistemlerinden daha verimlidir. Bununla birlikte, PVT/hava sistemleri, düşük konstrüksiyondan (malzemenin minimum kullanımı) ve diğerleri arasında işletme maliyetinden dolayı birçok pratik uygulamada kullanılmaktadır [169]. Havanın çalışan bir akışkan olarak kullanılması, bazı avantajlara sahiptir, ancak aynı zamanda suya kıyasla bazı dezavantajlara da sahiptir. Donma olmaması, çalışma sıvısının toplanmaması ve sızıntı durumunda hasar olmaması gibi avantajlara sahiptir. Avrupa ve Kuzey Amerika pazarlarına dayalı proje uygulamaları oluşturmak için yaygın olarak kabul görmüştür [170,171]. Bununla birlikte, dezavantajları da vardır: düşük ısı transferi, düşük ısı kapasitesi ve düşük ısı iletkenliği gibi havanın özellikleri dezavantajlar olarak kabul edilir. Havanın çalışma sıvısı olarak seçildiği PV/T sistemlerinde, çevreye olan ısı kayıpları büyüktür ve termal verimler genellikle %10 ila 20 arasındadır, çünkü PV'den hava akışına ısı transferi genellikle çok iyi değildir [172]. Çalışmada bakır kanatçık kullanımının nedeni bakırın yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasıdır [173].

Özet olarak, bu çalışmada, yukarıda belirtilen avantajlar nedeniyle çalışma sıvısı olarak hava seçilmiş, ısı transferini arttırmak için bir cam-cam panel tasarlanmış ve üretilmiştir. PV'den

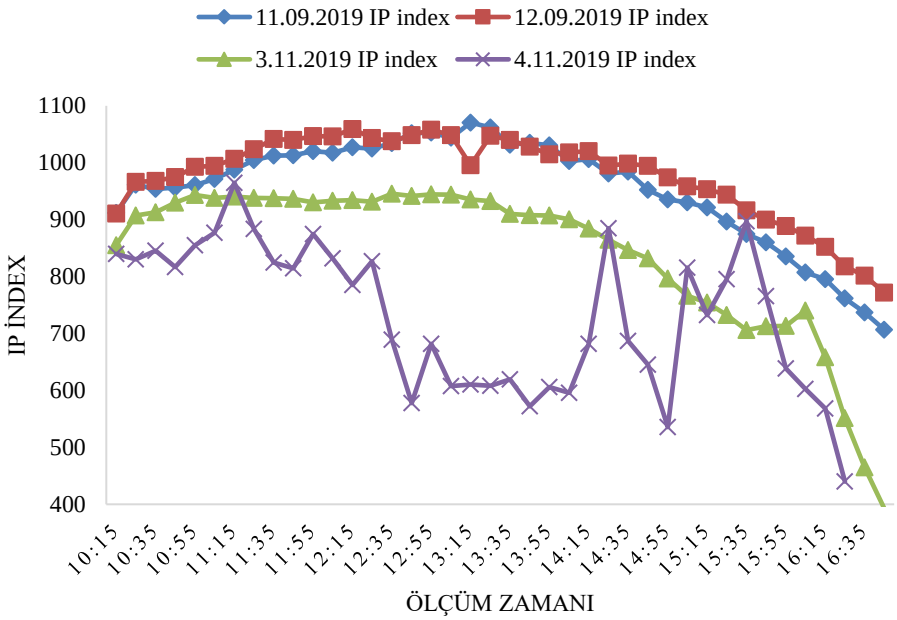
havaya ısı geçişini sağlamak için, kanatlar alt cam yüzeye tutturulmuş ve siyaha boyanmıştır. Kanat seçiminde, termal iletkenliği daha yüksek olan bakır malzeme seçilmiştir.

5.5. Enviroekonomik Analiz Sonuçları

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.31 ve Şekil 5.32) SI index ve IP değerlerinin zamanla değişimini göstermektedir. Fudholi [174] ve İbrahim [58] yaptıkları çalışmalarında IP değerini sırasıyla 173-369 Watt ve 404 Watt olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada, sırasıyla 11/09/2019 (ṁ= 0.0310387 kg/s), 12/09/2019 (ṁ= 0.02552), 03/11/2019 (ṁ= 0.045936 kg/s) ve 04/11/2019 (ṁ= 0.036424) tarihli deneyler sonucu elde edilen IP değerleri ise sırasıyla 1070-706, 1057-771, 945-392 ve 964-568 aralığında belirlenmiştir. Ortalama IP değerleri ise sırasıyla 956, 978, 841 ve 738 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, bu deneyler için SI değerleri sırasıyla, 1,21-1.12; 1,20-1,12; 1,23-1,02; ve 1,21-1,07 aralığında tespit edilmiştir. Ortalama SI değerleri ise 1,1828; 1,1794; 1,1945 ve 1,1675 olarak tespit edilmiştir. Aşağıdaki şekillerde IP ve SI değerlerinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Buna göre IP değerlerinin zamanla azaldığı görülmektedir [144]. Benzer şekilde, SI değerlerinin de zamanla azaldığı görülmektedir.

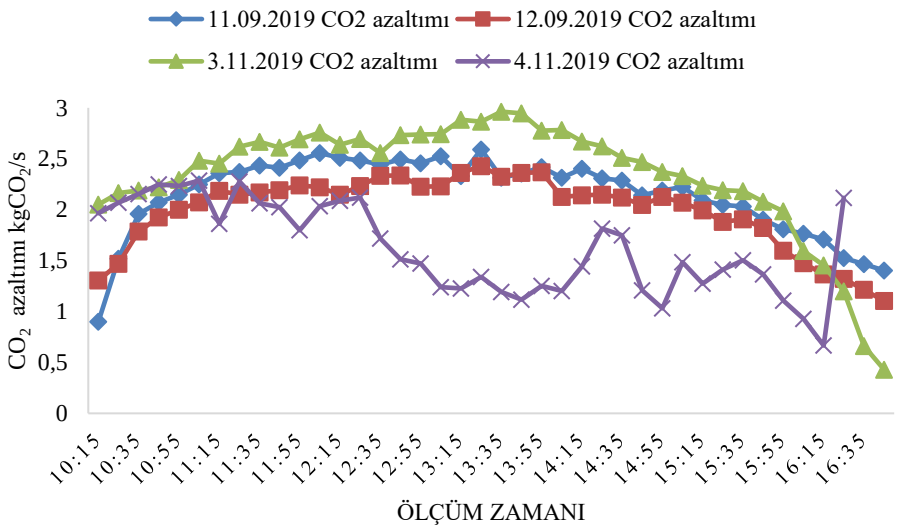


Şekil 5.31. Sürdürülebilirlik indeksinin zaman göre değişimi



Şekil 5.32. Geliştirme potansiyelinin zamana göre değişimi

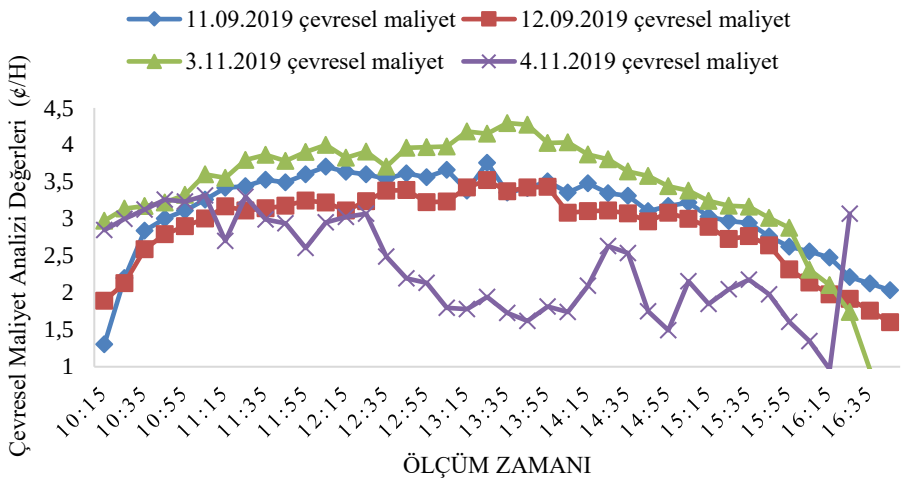
Bu çalışmada, sırasıyla 11/09/2019 (ṁ=0,0310387 kg/s), 12/09/2019 (ṁ=0,02552), 03/11/2019 (ṁ=0,045936 kg/s) ve 04/11/2019 (ṁ=0,036424) tarihli deneyler sonucu elde edilen CO_2 azatlımı (Φ_{CO_2}) değerleri ise sırasıyla sırasıyla 2,15; 1,99; 2,34 ve 1,62 $kgCO_2/s$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.33. CO2 azaltımının zamana göre değişimi

Zuhur ve Ceylan [175] çalışmasında CO_2 azaltımını (Φ_{CO_2}) 0,6 kg/s olarak belirlemişlerdir. Çevresel maliyet analizinde ise (Z_{CO_2}) as 1¢/s olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmada,

sırasıyla 11/09/2019 (ṁ=0,0310387 kg/s), 12/09/2019 (ṁ=0,02552), 03/11/2019 (ṁ=0,045936 kg/s) ve 04/11/2019 (ṁ=0,036424) tarihli deneyler sonucu elde edilen çevresel maliyet analizi (Z_{CO_2}) değerleri ise sırasıyla 3,12; 2,88; 3,39 ve 2,35 ¢/h olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.34. Çevresel maliyet analizi değerlerinin zamana göre değişmi

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Ankara ili iklim koşullarında yeni nesil bir tasarım olan PV/T panel performansı deneysel ve sayısal olarak test edilmiştir. PV/T panelin geometrisi oluşturulmuş ve Ansys programı yardımıyla bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Uygun kanatçık yapısını seçilerek panelden maksimum verim elde edilmesi sağlanmıştır. Yapılan HAD analizlerinden sonra PV/T panel tasarıma uygun bir şekilde üretilmiştir. Sistem performansına teknik bir bakış açısı sağlamak için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. PV/T panel otomasyon sistemine uygun bir biçimde infrared teknolojisi kullanılarak bir kurutucu geliştirilmiştir. PV/T panel kızılötesi konvektif kurutucu ile entegre edilerek farklı tarım ürünleri kurutulmuştur. Deneyler sonbahar ve kış şartlarında farklı hava debilerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iki farklı ürün kurutulmuştur. PV/T sisteminden elde edilen sıcak hava ile ürün kurutulması, elektrik enerjisi ile de sistemin bileşenleri olan fanların ve kızılötesi lambanın elektrik gekesinimi sağlanmıştır. Böylece net enerji dengesi sıfır olan bir sistem geliştirilmiştir. Fazla olan elektrik enerjisi akümülatörde depolanmıştır. Bununla beraber sistemin çevresel maliyet analizleri yapılmıştır. Ekserji analizinin farklı bir ifadesi olan sürdürülebilir endeksi ve iyileştirme potansiyeli analiz edilmiştir.

Yapılan HAD analizleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve %0,58 oranında hata yaklaşımıyla çözümleme sağlanmıştır.

Sonbaharda yapılan ilk deneyde (11/09/2019) ortalama solar radyasyon 928 W/m^2 ve ortalama çevre sıcaklığı 28°C olarak kaydedilmiştir. Bu çevre şartlarında ışınımda ve $\dot{m}$ =0,031087 kg/s debide yapılan deney sonucunda PV/T'den %50,66 (termal verimi %37,10 ve elektriksel verimi ise %13,56) oranında verim elde edilmiştir. Bunlara karşılık olarak da panelin çıkış havası sıcaklığının ortalama değeri 44,6°C olarak ölçülmüştür. Isıl kayıplar hesaplandıktan sonra ise kullanılmayan enerji ise akülerde depo edilmiştir. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 3399 W (%33.96), 1261 W (%13,71), 260 W (%2,83), 1001 W (%10,88) ve 3277 W (%35,62) olarak hesaplanmıştır.

Sonbaharda yapılan ikinci (12/09/2019) deneyde ortalama ışınım ve çevre havası sıcaklığı sırasıyla 944 W/m^2 ve 27,9°C olarak belirtilmiştir. Elde edilen termal ve elektriksel verim

sırasıyla %29,78 ve %13,73 olarak bulunmuştur. Panel çıkış havası sıcaklığı 44,8°C olarak ölçülmüştür. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 3358 W (%35,91), 1295 W (%13,73), 260 W (%2,78), 1035 W (%11,07) ve 3277 W (%36,39) olarak hesaplanmıştır.

Panelden elde edilen sıcak hava ile ürün kurutulmuş ve elektrik enerjisi ile de kurutucu bileşenleri olan olan fanların ve infrared lambanın çalıştırılması sağlanmıştır.

Kışın yapılan ilk deneyde (03/11/2019) ortalama 836 W/m^2 ışınımda ve 13,8°C hava sıcaklığındaki çevre şartlarında PV/T'den elde edilen termal ve elektriksel verimler sırasıyla %49,94 ve %13,98 olarak elde edilmiştir. Panelin çıkış havası sıcaklığının ortalama değeri sırasıyla 27,7°C olarak ölçülmüştür. Isıl kayıplar hesaplandıktan sonra ise kullanılmayan enerji ise akülerde depo edilmiştir. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 4160 W (%50,17), 1304 W (%15,73), 300 W (%3,62), 1004 W (%12,11) ve 1523 W (%18,37).olarak hesaplanmıştır. 03/11/2019 50 gr ağılığındaki nane yaprakları PV/T panelden elde edilen ortalama 28°C sıcaklıktaki ve (m=) 0,045936 kg/s debideki hava ile 290 dakikada kurutulmuştur.

Kışın yapılan ikinci deneyde (04/11/2019) ortalama solar radyasyon 704 W/m^2 ve 17°C'lik hava sıcaklığında termal ve elektriksel verim sırasıyla %37,50 ve %12,99 olarak belirlenmiştir. Panelin çıkış havası sıcaklığı da ortalama olarak 27,8°C olarak ölçülmüştür. Isıl kayıplar hesaplandıktan sonra ise kullanılmayan enerji ise akülerde depo edilmiştir. Isıl enerji, elektrik enerjisi, fanın tükettiği enerji, depo enerji miktarı ve ısıl kayıpların miktarı sırasıyla; 2379 W (%34,22), 861 W (%12,39), 260 W (%3,74), 601 W (%8,65) ve 2851 W (% 41) olarak hesaplanmıştır. 04/11/2019 100 gr ağırlığındaki elma dilimleri PV/T panelden elde edilen ortalama 27,8°C sıcaklıktaki ve (m=) 0,036424 kg/s debideki hava ile 370 dakikada kurutulmuştur.

Kurutma sistemlerinde üreticiler, ürünün daha kısa sürede kurumasını, uygun kalite kriterlerini karşılamasını ve ekipman ve enerji maliyetini düşürülmesini talep etmektedirler. Bu çalışmada, ürün yüzey sıcaklık kontrolü yapılarak üründe kalite iyileştirmesi sağlanmıştır. Bu bağlamda, konvektif kızılötesi kurutucu için gerekli olan enerjinin tamamı güneş enerjisinden sağlanmıştır. Böylece güneş enerjisi ile kurutucularda sürdürülebilirlik için yeni bir model geliştirilmiştir. Sistemin tüm elektrik ihtiyaçları güneş enerjisinden

sağlandığından, sıfır enerji maliyeti imkânı sağlanmıştır. Böylece, PV/T kurutma sistemleri ile kızılötesi konvektif kurutma yeni bir bakış açısı kazandırılması hedeflenmiştir.

PV/T sistemindeki enerji balansı konvektif kızılötesi kurutma teknolojisiyle son derece uyumlu hale getirilerek yeni nesil güneş enerjili, sürdürülebilir bir kurutucu ortaya konmuştur. Bu çalışma, güneş enerjili yenilenebilir enerji sistemlerinde kendi enerjisini üreten aynı zamanda enerjiyi verimli kullanan, hızlı, etkin ve daha kaliteli ürün kurutan kurutuculara örnektir.

• Güneş ışınımındaki her 100 W/m^2'lik artışın PV/T panelde yaklaşık 96 W'lık bir güç artışına neden olmuştur. Solar ışınımdaki bu artışın, PV veriminde %0,56 oranında bir azalmaya neden olmuştur. Ancak güneş panelinde, yaklaşık 23W değerinde bir güç artışı gözlenmiştir.

• Yapılan deneyler sonucunda güneş panelinin ortalama sıcaklığı 55,66 ° C'dir, bu referans CFD simülasyonundan 1,32°C daha düşük olduğu saptanmıştır.

• Güneş paneli sıcaklığındaki her 1°C düşüş için yapılan deneysel ölçüme göre, PV/T çıkış gücü 3,06W ve PV verimliliği %0,28 oranında artmaktadır.

• En yüksek PV/T termal verimi %41,46 ve maksimum çıkış sıcaklığı 49,46 ° C'dir.

• Maximum ekserji verimliliği %15,51 ve en yüksek PV/T ekserji çıkış gücü 246,29W ortalama ekserji çıkış gücü 213,4W olarak hesaplanmıştır.

• PV/T toplayıcıları temiz ve çevre dostudur, ayrıca insanları kullanmaya teşvik eder.

Bu çalışma ile tamamen güneş enerjisi kullanılarak kurutma gerçekleştirilmiştir. Enerji ve çevre açısından sürdürülebilir bir kurutma sisteminin büyük ölçekli olarak uygulanarak endüstriyel olarak kullanılabileceği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Fudholi, A., K. Sopian, B. Bakhtyar, M. Gabbasa, M. Y. Othman, and M. H. Ruslan, (2015). Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1191-1204.

2. Huang, B., T. Lin, W. Hung, and F. Sun, (2001a). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar energy*, 70, 443-448.

3. Othman, M., K. Sopian, B. Yatim, and W. R. W. Daud, (2006). Development of advanced solar assisted drying systems. *Renewable Energy*, 31, 703-709.

4. Kalogirou, S. A., and Y. Tripanagnostopoulos, (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Conversion and Management*, 47, 3368-3382.

5. Erdil, E., M. Ilkan, and F. Egelioglu, (2008). An experimental study on energy generation with a photovoltaic (PV)-solar thermal hybrid system. *Energy*, 33, 1241-1245.

6. Gomes, J., and Coauthors G.,, (2016). Analysis of different C-PVT reflector geometries. *Energy and Buildings*, 41,1248-1255.

7. Riggs, B. C., and Coauthors, (2017). Techno-economic analysis of hybrid PV/T systems for process heat using electricity to subsidize the cost of heat. *Applied Energy*, 208, 1370-1378.

8. Bianchini, A., A. Guzzini, M. Pellegrini, and C. Saccani, (2017). Photovoltaic/thermal (PV/T) solar system: Experimental measurements, performance analysis and economic assessment. *Renewable Energy*, 111, 543-555.

9. Ceylan, I., A. E. Gürel, H. Demircan, and B. Aksu, (2014). Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector. *Energy and Buildings*, 72, 96-101.

10. Ni, J., J. Li, W. An, and T. Zhu, (2018). Performance analysis of nanofluid-based spectral splitting PV/T system in combined heating and power application. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1160-1170.

11. Praveen kumar, B., D. Prince Winston, P. Pounraj, A. Muthu Manokar, R. Sathyamurthy, and A. E. Kabeel, (2018). Experimental investigation on hybrid PV/T active solar still with effective heating and cover cooling method. *Desalination*, 435, 140-151.

12. Rajput, U. J., and J. Yang, (2018). Comparison of heat sink and water type PV/T collector for polycrystalline photovoltaic panel cooling. *Renewable Energy*, 116, 479-491.

13. Amori, K. E., and M. A. Abd-AlRaheem, (2014). Field study of various air based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors. *Renewable Energy*, 63, 402-414.

14. Tonui, J. K., and Y. Tripanagnostopoulos, (2007). Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Energies*, 81, 498-511.

15. Cuce, E., P. M. Cuce, and T. Bali, (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*, 111, 374-382.

16. Huang, B. J., T. H. Lin, W. C. Hung, and F. S. Sun, (2001b). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar energy*, 70, 443-448.

17. Jie, J., L. Keliang, C. Tin-Tai, P. Gang, and H. Hanfeng, (2007). Thermal analysis of PV/T evaporator of a solar-assisted heat pump. *International Journal of Energy Research*, 31, 525-545.

18. Wang, G., Z. Quan, Y. Zhao, C. Sun, Y. Deng, and J. Tong, (2015). Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system. *Energy and Buildings*, 108, 175-184.

19. Wang, G., Z. Quan, Y. Zhao, C. Sun, and J. Tong, (2015). Performance Studies on a No vel Solar PV/T-air Dual Heat Source Heat Pump System. *Procedia Engineering*, 121, 771-778.

20. Sukamongkol, Y., S. Chungpaibulpatana, B. Limmeechokchai, and P. Sripadungtham, (2010). Condenser heat recovery with a PV/T air heating collector to regenerate desiccant for reducing energy use of an air conditioning room. *Energy and Buildings*, 42, 315-325.

21. Bakker, M., H. A. Zondag, M. J. Elswijk, K. J. Strootman, and M. J. M. Jong, (2005). Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump. *Solar energy*, 78, 331-339.

22. Preet, S., B. Bhushan, and T. Mahajan, (2017). Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Solar energy*, 155, 1104-1120.

23. Shi, Q., J. Lv, C. Guo, and B. Zheng, (2017). Experimental and simulation analysis of a PV/T system under the pattern of natural circulation. *Applied Thermal Engineering*, 121, 828-837.

24. Chen, J. F., L. Zhang, and Y. J. Dai, (2018). Performance analysis and multi-objective optimization of a hybrid photovoltaic/thermal collector for domestic hot water application. *Energy*, 143, 500-516.

25. Hajji, M., S. E. Naimi, B. Hajji, A. E. Mehdi, and M. L. E. Hafyani, (2015). Performance analysis of hybrid photovoltaic/thermal(PV/T) collector. 2015 3rd International *Renewable and Sustainable Energy,* 140, 511-520.

26. Rahman, M. M., M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, (2015). Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, 103, 348-358.

27. Duran, F., (2014). *PV/T hibrit sistemlerin termodinamik ve performans analizi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

28. Infield, D., L. Mei, and U. Eicker, (2004). Thermal performance estimation for ventilated PV facades. *Solar energy*, 76, 93-98.

29. Saloux, E., A. Teyssedou, and M. Sorin, (2013). Analysis of photovoltaic (PV) and photovoltaic/thermal (PV/T) systems using the exergy method. *Energy and Buildings*, 67, 275-285.

30. Sobhnamayan, F., F. Sarhaddi, M. A. Alavi, S. Farahat, and J. Yazdanpanahi, (2014). Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept. *Renewable Energy*, 68, 356-365.

31. İlhan, C., and G. A. Etem, (2015). Exergetic analysis of a new design photovoltaic and thermal (PV/T) System. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 34, 1249-1253.

32. Kolhe, M., D. Bin, and E. Hu, (2013). Water Cooled Concentrated Photovoltaic System. *Procedia Engineering*, 2, 159-163.

33. Cuce, E., and P. M. Cuce, (2014). Improving thermodynamic performance parameters of silicon photovoltaic cells via air cooling. *International Journal of Ambient Energy*, 35, 193-199.

34. Zimmermann, S., and Coauthors, (2015). A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 514-521.

35. Zagorska, V., I. Ziemelis, L. Kancevica, and H. Putans, (2012). Experimental investigation of photovoltaic-thermal hybrid solar collector. *Agronomy Research*, 10, 227-234.

36. Radziemska, E., (2003). The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28, 1-12.

37. Teo, H. G., P. S. Lee, and M. N. A. Hawlader, (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90, 309-315.

38. Tonui, J. K., and Y. Tripanagnostopoulos, (2008). Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar energy*, 82, 1-12.

39. Tripanagnostopoulos, Y., T. Nousia, M. Souliotis, and P. Yianoulis, (2002). Hybrid photovoltaic/thermal solar system. *Energy Reports*, 72, 217-234.

40. Chow, T. T., J. Ji, and W. He, 2007: Photovoltaic-Thermal Collector System for Domestic Application. *Procedia*, 129, 415-422.

41. Engin, D., and M. Çolak, (2008). Yarı Saydam Güneş Pili. Termal Toplayıcı (PV/T) Hibrid Sistemin İzmir Koşullarında Analizi, *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2, 1-13.

42. Shahsavar, A., and M. Ameri, (2010). Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. *Solar energy*, 84, 1938-1958.

43. Hegazy, A. A., (2000). Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and Management*, 41, 861-881.

44. Tiwari, A., and M. S. Sodha, (2007). Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. *Solar energy Materials and Solar Cells*, 91, 17-28.

45. Bosanac, M., B. Sørensen, I. Katic, H. Sørensen, B. Nielsen, and J. Badran, (2018). Photovoltaic/Thermal solar collectors and their potential in denmark. *Energy*, 46, 214-221.

46. Fernandes, C. A. F., J. P. N. Torres, P. J. C. Branco, J. Fernandes, and J. Gomes, (2017). Cell string layout in solar photovoltaic collectors. *Energy Conversion and Management*, 149, 997-1009.

47. Doğanay, H. Ö., (2014). *Kırklareli iklim şartlarında Hibrit Fotovoltaik/termal sistemin analizi*, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi.

48. Barnwal, P., and G. N. Tiwari, (2008). Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study. *Solar energy*, 82, 1131-1144.

49. Garg, H. P., and R. S. Adhikari, (1997). Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation. *Renewable Energy*, 11, 363-385.

50. Garg, H. P., and R. S. Adhikari, (1999). System performance studies on a photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collector. *Renewable Energy*, 16, 725-730.

51. Rosell, J. I., X. Vallverdú, M. A. Lechón, and M. Ibáñez, (2005). Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 46, 3034-3046.

52. Chow, T. T., G. Pei, K. Fong, Z. Lin, A. Chan, and J. Ji, (2009). Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy*, 86, 310-316.

53. Souliotis, M., and Coauthors, (2008). Experimental study of a thermosiphonic hybrid PV/T solar system. *Solar engineering systems*, 41, 311-3320

54. Anderson, T. N., M. Duke, G. L. Morrison, and J. K. Carson, (2009). Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector. *Solar energy*, 83, 445-455.

55. Touafek, K., M. Haddadi, and A. Malek, (2009). Experimental study on a new hybrid photovoltaic thermal collector. Applied *Solar energy*, 45, 181.

56. Agrawal, S., and A. Tiwari, (2011). Experimental validation of glazed hybrid micro-channel solar cell thermal tile. *Solar energy*, 85, 3046-3056.

57. Yang, D. J., Z. F. Yuan, P. H. Lee, and H. M. Yin, (2012). Simulation and experimental validation of heat transfer in a novel hybrid solar panel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 1076-1082.

58. Ibrahim, A., A. Fudholi, K. Sopian, M. Y. Othman, and M. H. Ruslan, (2014). Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management*, 77, 527-534.

59. He, W., J. Zhou, C. Chen, and J. Ji, (2014). Experimental study and performance analysis of a thermoelectric cooling and heating system driven by a photovoltaic/thermal system in summer and winter operation modes. *Energy Conversion and Management*, 84, 41-49.

60. Gaur, A., G. N. Tiwari, C. Ménézo, and I. M. Al-Helal, (2016). Numerical and experimental studies on a Building integrated Semi-transparent Photovoltaic Thermal (BiSPVT) system: Model validation with a prototype test setup. *Energy Conversion and Management*, 129, 329-343.

61. Othman, M. Y., S. A. Hamid, M. A. S. Tabook, K. Sopian, M. H. Roslan, and Z. Ibarahim, (2016). Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study. *Renewable Energy*, 86, 716-722.

62. Hazami, M., F. Mehdaoui, N. Naili, M. Noro, R. Lazzarin, and A. Guizani, (2017). Energetic, exergetic and economic analysis of an innovative Solar CombiSystem (SCS) producing thermal and electric energies: Application in residential and tertiary households. *Energy Conversion and Management*, 140, 36-50.

63. Aste, N., G. Chiesa, and F. Verri, (2008). Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) air collector. *Renewable Energy*, 33, 914-927.

64. Qureshi, U., P. Baredar, and A. Kumar, (2014). Effect of weather conditions on the Hybrid solar PV/T Collector in variation of Voltage and Current. *Energy Reports*, 1, 872-879.

65. Li, G., G. Pei, J. Ji, M. Yang, Y. Su, and N. Xu, (2015). Numerical and experimental study on a PV/T system with static miniature solar concentrator. *Solar energy*, 120, 565-574.

66. Good, C., I. Andresen, and A. G. Hestnes, (2015). Solar energy for net zero energy buildings - A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic-thermal (PV/T) systems. *Solar Energy*, 122, 986-996.

67. Ahn, J.-G., J.-H. Kim, and J.-T. Kim, (2015). A Study on Experimental Performance of Air-Type PV/T Collector with HRV. *Energy Procedia*, 78, 3007-3012.

68. Farshchimonfared, M., J. I. Bilbao, and A. B. Sproul, (2016). Full optimisation and sensitivity analysis of a photovoltaic-thermal (PV/T) air system linked to a typical residential building. *Solar energy*, 136, 15-22.

69. Delisle, V., and M. Kummert, (2016). Cost-benefit analysis of integrating BIPV-T air systems into energy-efficient homes. *Solar energy*, 136, 385-400.

70. Rounis, E. D., A. K. Athienitis, and T. Stathopoulos, (2016). Multiple-inlet Building Integrated Photovoltaic/Thermal system modelling under varying wind and temperature conditions. *Solar energy*, 139, 157-170.

71. Hu, J., W. Chen, D. Yang, B. Zhao, H. Song, and B. Ge, (2016). Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days. *Applied Energy*, 173, 40-51.

72. Connelly, K., Y. Wu, J. Chen, and Y. Lei, (2016). Design and development of a reflective membrane for a novel Building Integrated Concentrating Photovoltaic (BICPV) 'Smart Window' system. *Applied Energy*, 182, 331-339.

73. Hazami, M., A. Riahi, F. Mehdaoui, O. Nouicer, and A. Farhat, (2016). Energetic and exergetic performances analysis of a PV/T (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions. *Energy*, 107, 78-94.

74. Mojumder, J. C., W. T. Chong, H. C. Ong, K. Y. Leong, and M. Abdullah Al, (2016). An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy and Buildings*, 130, 272-285.

75. Mojumder, M. S. S., M. Uddin, I. Alam, and K. Enam, (2013). Study of Hybrid Photovoltaic Thermal (PV/T) Solar System with Modification of Thin Metallic Sheet in the Air Channel. *Jurnal of Energy Technologies and Policy*, 47-55.

76. Al-Waeli, A. H. A., K. Sopian, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, (2017). Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 109-130.

77. Jahromi, S. N., A. Vadiee, and M. Yaghoubi, (2015). Exergy and Economic Evaluation of a Commercially Available PV/T Collector for Different Climates in Iran. *Energy Procedia*, 75, 444-456.

78. Alzaabia, A. A., N. K. Badawiyeha, H. O. Hantousha, and A. Hamid, (2014). Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3, 541-550.

79. PALASKAR, V. N., and S. Deshmukh, (2015). Performance Analysis of Especially Flow Design Heat Exchanger used in Hybrid Solar System. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 5, 476-482.

80. Haddad, S., K. Touafek, and A. Khelifa, (2015). Investigation of the electrical and thermal performance of a PV/T hybrid system. *Ecological Vehicles and Renewable Energies*, 121, 411-589

81. Daghigh, R., M. H. Ruslan, A. Zaharim, and K. Sopian, (2011). Monthly performance of a photovoltaic thermal (PV/T) water heating system. *Energy Proceeding*, 141, 256-265

82. Deshmukh, S., and V. Palaskar, 2015: Waste Heat Recovery Study of Spiral Flow Heat Exchanger Used in Hybrid Solar System with Reflectors. *Energy*, 5, 6-16.

83. Rosa-Clot, M., P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, (2016). Experimental photovoltaic-thermal Power Plants based on TESPI panel. *Solar energy*, 133, 305-314.

84. Al-Nimr, M. d. A., and W. A. Al-Ammari, (2016). A novel hybrid PV-distillation system. *Solar energy*, 135, 874-883.

85. Khanjari, Y., F. Pourfayaz, and A. Kasaeian, 2016: Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. *International Journal of Numerical Methods*, 122, 263-278.

86. Al-Shamani, A. N., K. Sopian, S. Mat, H. A. Hasan, A. M. Abed, and M. H. Ruslan, (2016). Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions. *Energy Conversion and Management*, 124, 528-542.

87. Sopian, K., M. A. Alghoul, E. M. Alfegi, M. Y. Sulaiman, and E. A. Musa, (2009). Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-nonporous media. *Renewable Energy*, 34, 640-645.

88. Solanki, S. C., S. Dubey, and A. Tiwari, (2009). Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors. *Applied Energy*, 86, 2421-2428.

89. Dubey, S., S. Solanki, and A. Tiwari, (2009). Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series. *Energy and Buildings*, 41, 863-870.

90. L. Jin, G., and Coauthors, (2010). Evaluation of Single-Pass Photovoltaic-Thermal Air Collector with Rectangle Tunnel Absorber. *Journal of clean energy*, 7, 410-416.

91. Golzari, S., A. Kasaeian, M. Amidpour, S. Nasirivatan, and S. Mousavi, (2018). Experimental investigation of the effects of corona wind on the performance of an air-cooled PV/T. *Renewable Energy*, 127, 284-297.

92. Kumar, R., and M. A. Rosen, (2011). Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins. *Applied Thermal Engineering*, 31, 1402-1410.

93. Hussain, F., M. Othman, B. Yatim, M. H. Ruslan, K. Sopian, and Z. Ibarahim, (2014) A Study of PV/T Collector with Honeycomb Heat Exchanger. *Journal of cleaner energy*. 56, 1571-1578.

94. Slimani, M. E. A., M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, and W. B. Chaouch, (2017). A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 133, 458-476.

95. Hao, W., S. Liu, B. Mi, and Y. Lai, (2020). Mathematical Modeling and Performance Analysis of a New Hybrid Solar Dryer of Lemon Slices for Controlling Drying Temperature. *Energies*, 13, 350.

96. Tiwari, S., and G. Tiwari, (2016). Exergoeconomic analysis of photovoltaic-thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer. *Energy*, 114, 155-164.

97. --, (2017). Energy and exergy analysis of a mixed-mode greenhouse-type solar dryer, integrated with partially covered N-PVT air collector. *Energy*, 128, 183-195.

98. Tiwari, S., S. Agrawal, and G. Tiwari, (2018). PVT air collector integrated greenhouse dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 142-159.

99. Sharma, A., C. R. Chen, and N. Vu Lan, (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1185-1210.

100. Assoa, Y. B., F. Sauzedde, and B. Boillot, (2018). Numerical parametric study of the thermal and electrical performance of a BIPV/T hybrid collector for drying applications. *Renewable Energy*, 129, 121-131.

10. 1 Eltawil, M. A., M. M. Azam, and A. O. Alghannam, (2018). Energy analysis of hybrid solar tunnel dryer with PV system and solar collector for drying mint (MenthaViridis). *Journal of cleaner production*, 181, 352-364.

102. Cemeroğlu, B., F. Karadeniz, and M. Özkan, (2009). Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi1, *Gıda Teknolojisi Derneği Dergisi*, 12, 54-61.

103. Başaran, B., B. Bitlisli, Ö. Sarı, N. Özbalta, ve Güngör, A. (2012). *Deri Kurutulmasında Yeni Teknolojiler: Isı Pompalı Kurutucular*. I. Ulusal Deri Sempozyumu, 7-8.

104. Doymaz, İ., (2001). *Üzüm ve Kahramanmaraş biberinin kuruma karakteristiklerinin incelenmesi*. 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi.

105. Yağcıoğlu, A., (1999). *Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniği*, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 536-540.

106. Pala, M., ve Y. B. Saygı, (1983). Su Aktivitesi ve Gıda İşletmedeki Önemi. *Gıda Dergisi*; 8,15-24.

107. Evranuz, Ö., (1988). Gıda Maddelerinin Kurutulması Sırasında Kuruma Kinetiğini Kontrol Eden Faktör ve Kalite Üzerine Etkileri. *The Journal Of Food*, 13, 54-61.

108. Çataltaş, İ., (1973). *Kimya Mühendisliğine Giriş 2. İnkılap ve Ata Yayınevi, İstanbul.*89-95.

109. Güngör, A., ve Özbalta, N, (1997). *Endüstriyel kurutma sistemleri.* Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 14.

110. Doymaz, I., and M. Pala, (2002). Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55, 331-335.

111. Ergüneş, G., and S. Tarhan, (2006). Color retention of red peppers by chemical pretreatments during greenhouse and open sun drying. *Journal of Food Engineering*, 76, 446-452.

112. Öztekin, S., A. Başçetinçelik, and Y. Soysal, (1999). Crop drying programme in Turkey. *Renewable Energy*, 16, 789-794.

113. Strumillo, C., (1986). Drying: principles, applications, and design. *Drying*, 3, 541-546.

114. Lewis, M. J., (1990). Physical properties of foods and food processing systems. *Energy*, 54, 411-420.

115. Chua, K., and S. Chou, (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science and Technology*, 14, 519-528.

116. Sandu, C., (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnology progress*, 2, 109-119.

117. Ranjan, R., J. Irudayaraj, and S. Jun, (2002). Simulation of infrared drying process. Drying technology, 20, 363-379.

118. Mongpraneet, S., T. Abe, and T. Tsurusaki, (2004). Kinematic model for a far infrared vacuum dryer. *Drying technology*, 22, 1675-1693.

119. Nuthong, P., A. Achariyaviriya, K. Namsanguan, and S. Achariyaviriya, (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, 102, 233-239.

120. Sakai, N., and T. Hanzawa, (1994). Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science and Technology*, 5, 357-362.

121. Rosenthal, I., (2006). Irradiation for better foods. *Trends in food science and Technology*, 17, 148-152

122. Hashimoto, A., M. Takahashi, T. Honda, M. Shimizu, And A. Watanabe, (1990). Penetration of infrared radiation energy into sweet potato. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 37, 887-893.

123. Abukhalifeh, H., R. Dhib, and M. Fayed, (2005). Model predictive control of an infrared-convective dryer. *Drying technology*, 23, 497-511.

124. Pawar, S. B., and B. Thorat, (2011). Infrared drying of alumina-silicate mineral cake. *Drying Technology*, 29, 819-824.

125. Toğrul, H., (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71, 311-323.

126. Nowak, D., and P. P. Lewicki, (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 353-360.

127. Masamura, A., H. Sado, T. Honda, M. Shimizu, H. Nabetani, M. Nakajima, And A. Watanabe, (1988). Drying of potato by far infrared radiation. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 35, 309-314.

128. Fu, W. R., And W. R. Lien, (1998). Optimization of far infrared heat dehydration of shrimp using RSM. *Journal of Food Science*, 63, 80-83.

129. Sharma, G., R. Verma, and P. Pathare, (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.

130. Swasdisevi, T., S. Devahastin, P. Sa-Adchom, and S. Soponronnarit, (2009). Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92, 100-106.

131. Arsoy, S., (2008). Temperature-controlled infrared drying characteristics of soils. *Drying Technology*, 26, 1477-1483.

132. Mujumdar, A. S., 1995: *Handbook of industrial drying, revised and expanded*. CRC Press, 101-106.

133. Shilton, N., P. Mallikarjunan, and P. Sheridan, (2002). Modeling of heat transfer and evaporative mass losses during the cooking of beef patties using far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 55, 217-222.

134 Hashimoto, A., and T. Kameoka, (1999). Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. Drying Technology, 17, 1613-1626.

135. Bingöl, G., and O. Devres, (2011). Gıda işlemede kurutma teknolojilerinin temel ilkeleri. *İstanbul Sanayi Odası Dergisi*, 75, 79-86.

136. Hebbar, H. U., K. Vishwanathan, and M. Ramesh, (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of food engineering*, 65, 557-563.

137. Shih, C., Z. Pan, T. Mchugh, D. Wood, and E. Hirschberg, (2008). Sequential infrared radiation and freeze-drying method for producing crispy strawberries. *Transactions of the Asabe*, 51, 205-216.

138. Zhang, X., X. Zhao, S. Smith, J. Xu, and X. Yu, (2012). Review of RandD progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 599-617.

139. Özakin, A. N., and F. Kaya, (2019). Effect on the exergy of the PVT system of fins added to an air-cooled channel: A study on temperature and air velocity with ANSYS Fluent. *Solar energy*, 184, 561-569.

140. Şevik, S., M. Aktaş, E. C. Dolgun, E. Arslan, and A. D. Tuncer, (2019). Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. *Solar energy*, 180, 537-549.

141. Holman, J. P., (2001). *Experimental methods for engineers*. Elsevier, 74, 512-520.

142. Anderson, A. M., (1994). JP Holman, McGraw-Hill, New York, *Experimental methods for engineers*. Elsevier, 94, 610-616.

143. Aktaş, M., A. Sözen, A. Amini, and A. Khanlari, (2017). Experimental analysis and CFD simulation of infrared apricot dryer with heat recovery. *Drying Technology*, 35, 766-783.

144. Akpinar, E. K., (2010). Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses. *Energy Conversion and Management*, 51, 2407-2418.

145. Caliskan, H., I. Dincer, and A. Hepbasli, (2012). Exergoeconomic, enviroeconomic and sustainability analyses of a novel air cooler. *Energy and Buildings*, 55, 747-756.

146. Sovacool, B. K., (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. Energy Policy, 36, 2950-2963.

147. Tripathi, R., G. Tiwari, and V. Dwivedi, (2016). Overall energy, exergy and carbon credit analysis of N partially covered photovoltaic thermal (PVT) concentrating collector connected in series. *Solar energy*, 136, 260-267.

148. den Elzen, M. G., and Coauthors, (2011). The Copenhagen Accord: abatement costs and carbon prices resulting from the submissions. *Environmental Science and Policy*, 14, 28-39.

149. Caliskan, H., (2017). Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenviroeconomic (EXENEC) analyses of solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 488-492.

150. Fudholi, A., K. Sopian, M. Gabbasa, B. Bakhtyar, M. Yahya, M. H. Ruslan, and S. Mat, (2015). Techno-economic of solar drying systems with water based solar collectors in Malaysia: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 809-820.

151. Fudholi, A., and Coauthors, (2018). Energy and exergy analyses of photovoltaic thermal collector with?-groove. *Solar energy*, 159, 742-750.

152. Van Gool, W., 1997: Energy policy: fairy tales and factualities. Innovation and technology-strategies and policies, *Springer*, 83, 93-105.

153. Qader, B. S., E. Supeni, M. Ariffin, and A. A. Talib, (2019). Numerical investigation of flow through inclined fins under the absorber plate of solar air heater. *Renewable Energy*, 141, 468-481.

154. Malalasekera, W., and H. Versteeg, (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. *Pearson Prentice Hall*, 140,698-705.

155. Release, A. F., (2013). 15.0, ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc, Canonsburg, PA, USA.

156. Ansys, I., (2011). ANSYS FLUENT theory guide. Canonsburg, Pa, 794.

157. Khanlari, A., A. Sözen, and H. İ. Variyenli, (2019). Simulation and experimental analysis of heat transfer characteristics in the plate type heat exchangers using TiO2/water nanofluid. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 29, 1343-1362.

158. Sudhakar, K., and T. Srivastava, (2014). Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*, 35, 51-57.

159. Sarhaddi, F., S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. M. Adeli, (2010). An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy*, 87, 2328-2339.

160. Saidur, R., G. BoroumandJazi, S. Mekhlif, and M. Jameel, (2012). Exergy analysis of solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 350-356.

161. Dubey, S., G. S. Sandhu, and G. N. Tiwari, (2009). Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector. *Applied Energy*, 86, 697-705.

162. Dubey, (2009). Theoretical performance assessment of an integrated photovoltaic and earth air heat exchanger greenhouse using energy and exergy analysis methods. *Energy and Buildings*, 41, 888-896.

163. Nayak, S., and G. Tiwari, (2008). Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse. *Energy and Buildings*, 40, 2015-2021.

164. Farahat, S., F. Sarhaddi, and H. Ajam, (2009). Exergetic optimization of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 34, 1169-1174.

165. Agrawal, B., and G. Tiwari, (2010). Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions. *Applied Energy*, 87, 417-426.

166. Ajam, H., S. Farahat, and F. Sarhaddi, (2005). Exergetic optimization of solar air heaters and comparison with energy analysis. *International Journal of Thermodynamics*, 8, 183-190.

167. Moradi, K., M. Ali Ebadian, and C.-X. Lin, (2013). A review of PV/T technologies: Effects of control parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 483-500.

168. Tripanagnostopoulos, Y., (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar energy*, 81, 1117-1131.

169. Prakash, J., (1994). Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy Conversion and Management*, 35, 967-972.

170. Chow, T. T., (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87, 365-379.

171. Aste, N., M. Beccali, and G. Chiesa, (2002). Experimental evaluation of the performance of a prototype hybrid solar photovoltaic-thermal (PV/T) air collector for the integration in sloped roof. *Proceedings Of Epic*, 51, 616-621.

172. Zondag, H., and Coauthors, (2005). PVT roadmap. A European guide for the development and market introduction of PVT technology, *Solar Energy*, 38, 541-550.

173. Toolbox, E., (2003). Thermal Conductivity of common Materials and Gases. *Energy Procedia*, 49, 541-550.

174. 1. Fudholi, A., K. Sopian, M. H. Ruslan, M. Alghoul, and M. Sulaiman, (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14, 1-30.

175. Zuhur, S., and İ. Ceylan, (2019). Energy, Exergy and Enviroeconomic (3E) analysis of concentrated PV and thermal system in the winter application. *Energy Reports*, 5, 262-270.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı	: Arslan, Erhan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 28.10.1985, Diyarbakır
Medeni hali	: Evli
e-mail	: erhana1985@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Çevre Bilimleri	2015
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi/Meteoroloji Müh.	2011
Lise	Diyarbakır Birlik Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Meteoroloji Genel Müdürlüğü	Met. Müh.

Yabancı Dil

İngilizce B2, (YDS:55, YÖKDİL:72.5), Almanca A1

Yayınlar

Hakemli uluslararası dergilerde yayınlanan makaleler (SCI, SSCI, ESCI) SCI

1. Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E. C., **Arslan, E.,** & Tuncer, A. D. (2019). Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. Solar Energy, 180, 537-549.

2. Aktaş, M., Sozen, A., Tuncer, D. A., **Arslan, E.,** Koşan, M., Curuk , O., Energy-Exergy Analysis of A Novel Multi-Pass Solar Air Collector With Perforated Fins. International Journal of Renewable Energy Development, 2019. 8(1). 47-55.

3. Aktaş, M., Koşan, M., **Arslan, E.,** & Tuncer, A. D. (2019). Designing a novel solar-assisted heat pump system with modification of a thermal energy storage unit. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 233(5), 588-603.

4. **Arslan, E.,** Tuncer, A. D., Koşan, M., Aktaş, M., Can E. D. (2020). Designing Of A New Type Air-Water Cooled Photovoltaic Collector. Techniki Glasnik, 14(1). DOI: 10.31803/tg-20190227095246

Hakemli ulusal dergilerde yayınlanan makaleler

1. **Arslan, E.,** A Case Study Of Hailstorms Over Hatay Turkey By Using Dual Polarization Radar Data. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017. 2(3).

2. **Arslan, E.,** H. Topal, and M.U. Yıldırım, Güneşlenme Şiddetini Ölçen Aletlerin Verilerinin Iğdir İlinde Gösterdiği Değişkenlikler Ve Bunlarin Nedenlerinin İncelenmesi. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD), 2016. 2(1): p. 41-51.

3. **Arslan, E.** and TOPAL, H., Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgesel Analizi Ve Enerji Üretim Sistemlerine Uyarlanmasi Üstüne Bir Araştirma.

4. **Arslan, E.,** A Case Study Of Hailstorms Over Hatay Turkey By Using Dual Polarization Radar Data. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017. 2(3).

Uluslararası Kongre, Sempozum ve Konferanslarda sunulan bildiriler

1. Aktaş, M, Sözen, A, Tuncer, AD, **Arslan, E,** Koşan, M, Çürük, O, Design and thermal performance analysis of a novel multi-pass solar air collector with perforated fins. 6th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 25-27 June 2018, Istanbul, Turkey.

2. Aktaş, M., Koşan, M., **Arslan, E.,** Tuncer, AD., Şensoy, B. Designing of a novel solar assisted heat pump system with thermal energy storage. 6th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 25-27 June 2018, Istanbul, Turkey.

3. Aktaş, M., **Arslan, E.,** Tuncer, AD, Boran, K., Energy, and exergy analysis of photovoltaic-thermal systems. 1st International Conference on Energy Systems Engineering November 2-4, 2017 KBU Karabuk, Turkey.

4. Aktaş, M., Tuncer, AD, **Arslan, E.,** Dolgun E. C., Performance analysis of a v-corrugated double-pass solar air collector. The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, 10-12 April 2018 in ÇEŞME/İZMİR.

5. Aktaş, M., **Arslan, E.,** Tuncer, AD, Investıgatıon and analysıs of photovoltaıc-thermal systems. The Internatinonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, 10-12 April 2018 in ÇEŞME/İZMİR.

6. Tuncer, AD, Koşan, M, Dolgun EC, M, Aktaş, **Arslan, E,** Design of a novel modular photovoltaic-thermal (PV/T) collector. International conferance on technology and science, 13-15 december, Antalya, Turkey.

Hobiler

Duyduğum bir müziği bağlama ile çalmayı ve İngilizce şarkı sözlerini çevirisini severim. Tarihi yerleri gezmeyi severim, belgesel izlemeyi diğer her şeyi izlemeye yeğlerim.



GAZİ GELECEKTİR...